



TESIS - RE142541

**PENURUNAN KADAR LOGAM TEMBAGA DAN BESI PADA
LIMBAH CAIR INDUSTRI PERHIASAN EMAS
MENGUNAKAN KARBON AKTIF MELALUI PROSES
PRESIPITASI DAN ADSORPSI**

MARIA ANGELINA TUAS

03211650010009

DOSEN PEMBIMBING

Dr. Ali Masduqi, S.T., M.T

PROGRAM MAGISTER

DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN

FAKULTAS TEKNIK SIPIL, LINGKUNGAN, DAN KEBUMIHAN

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

SURABAYA

2018



THESIS - RE142541

REMOVAL OF COPPER AND IRON CONTENT IN JEWELRY INDUSTRY WASTEWATER USING ACTIVATED CARBON WITH PRECIPITATION AND ADSORPTION METHODS

MARIA ANGELINA TUAS

03211650010009

SUPERVISOR

Dr. Ali Masduqi, S.T., M.T

MASTER PROGRAM

ENVIRONMENTAL ENGINEERING DEPARTEMEN

FACULTY OF CIVIL, ENVIRONMENTAL AND GEO ENGINEERING

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

SURABAYA

2018

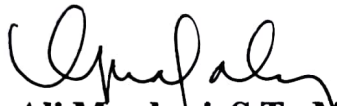
LEMBAR PENGESAHAN


Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Teknik (M.T)
di
Institut Teknologi Sepuluh Nopember


Oleh :
Maria Angelina Tuas
NRP. 03211650010009


Tanggal Ujian : 9 Juli 2018
Periode Wisuda : September 2018

Disetujui oleh :

1. 
Dr. Ali Masduqi, S.T., M.T. (Pembimbing)
NIP. 19680128 199403 1 003

2. 
Prof. Ir. Wahyono Hadi, M.Sc., Ph.D. (Penguji)
NIP. 19500114 197903 1 001

3. 
Dr. Ir. Agus Slamet, M.Sc. (Penguji)
NIP. 19590811 198701 1 001

4. 
Dr. Ir. Ellina Sitepu Pandebesie, M.T. (Penguji)
NIP. 19560204 199203 2 001



Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan dan Kebumihan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Dekan,


D.A.A. Warmadewanthi, S.T., M.T., Ph.D.
NIP. 19750212 199903 2 001

PENURUNAN KADAR LOGAM TEMBAGA DAN BESI PADA LIMBAH CAIR INDUSTRI PERHIASAN EMAS MENGUNAKAN KARBON AKTIF MELALUI PROSES PRESIPITASI DAN ADSORPSI

Nama Mahasiswa : Maria Angelina Tuas
NRP : 03211650010009
Pembimbing : Dr. Ali Masduqi, S.T., M.T.

ABSTRAK

Penyisihan logam berat dalam limbah cair industri perhiasan emas dengan metode presipitasi dan adsorpsi menggunakan karbon aktif mampu menurunkan kadar logam Cu dan Fe. Pengaruh jenis adsorben dan ukuran partikel adsorben terhadap penyisihan logam Cu dan Fe telah dilakukan. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui efisiensi proses presipitasi dan adsorpsi terhadap logam Cu dan Fe, menganalisis isoterm dan kinetika adsorpsi karbon aktif serta mengetahui kemampuan penyisihan logam Cu dengan proses adsorpsi secara kontinyu.

Penelitian ini menggunakan adsorben karbon aktif komersial dan limbah sekam padi yang diaktivasi menjadi karbon aktif. Variasi ukuran partikel adsorben yaitu 10-20 mesh dan 40-50 mesh. Karbon aktif sebelum dan setelah digunakan sebagai adsorben dikarakterisasi menggunakan SEM-EDX. Proses presipitasi dilakukan dengan penambahan NaOH sebagai agen presipitasi untuk mengurangi konsentrasi logam Cu dan Fe dari efluen limbah cair industri perhiasan emas. Proses adsorpsi dengan karbon aktif terhadap limbah hasil presipitasi dilakukan secara *batch* dengan memvariasikan dosis dan waktu adsorpsi. Analisis kandungan logam berat dilakukan dengan menggunakan AAS. Proses adsorpsi secara kontinyu dilakukan terhadap logam Cu berdasarkan efisiensi penyisihan logam optimum pada sistem *batch*.

Hasil karakterisasi karbon aktif komersial dan sekam padi sebelum digunakan sebagai adsorben menunjukkan distribusi pori yang teratur dan kosong pada seluruh permukaan partikel. Sedangkan setelah digunakan dalam proses adsorpsi, pori-pori tersebut menjadi tertutup dan tidak teratur serta ditemukan logam Cu dan Fe yang terserap dalam adsorben komersial maupun sekam padi. Efisiensi penyisihan logam Cu dan Fe pada proses presipitasi pH 9 masing-masing mencapai 99,94% dan 99,99% telah memenuhi baku mutu. Sedangkan pada pH 7, efisiensi penyisihan logam Cu dan Fe masing-masing sebesar 99,86% dan 99,99%, belum memenuhi baku mutu. Efisiensi penurunan kadar logam Cu pada proses adsorpsi dengan adsorben komersial dan sekam padi sebesar 8,42% dan 16,84%, telah memenuhi baku mutu. Ditinjau dari model Langmuir, kapasitas adsorpsi maksimum logam Cu dengan adsorben komersial sebesar 0,004 mg/g (10-20 mesh) dan 0,1845 mg/g (40-50 mesh) sedangkan sekam padi sebesar 0,0201 mg/g (10-20 mesh) dan 0,0012 mg/g (40-50 mesh). Isoterm dan kinetika adsorpsi berdasarkan kapasitas penyerapan maksimum logam Cu mengacu pada

model Freundlich-Orde dua semu. Adsorpsi logam Cu secara kontinyu mengikuti model Thomas dengan nilai K_{Th} -0,000058 ml/mg.menit dan q_0 sebesar 27,396 mg/g.

Kata kunci: Adsorpsi, Cu, limbah industri, presipitasi, sekam padi

REMOVAL OF COPPER AND IRON CONTENT IN JEWELRY INDUSTRY WASTEWATER USING ACTIVATED CARBON WITH PRECIPITATION AND ADSORPTION METHODS

Name : Maria Angelina Tuas
Student ID : 03211650010009
Supervisor : Dr. Ali Masduqi, S.T., M.T.

ABSTRACT

The removal of heavy metals in jewelry industry wastewater by precipitation and adsorption methods using activated carbon can reduce the concentration of Cu and Fe metals. The influence of adsorbent type and particle size toward the removal of Cu and Fe metals has been conducted in this study. This study aims to determine the efficiency of precipitation and adsorption processes of Cu and Fe metals, to analyze the isotherm and kinetics of activated carbon adsorption and to know the removal ability of Cu metal with a continuous adsorption process.

This study used commercial activated carbon and rice husk waste which had been activated into activated carbon. Particle size of adsorbent were varied into 10-20 mesh and 40-50 mesh. Activated carbons before and after being used as adsorbents were characterized using SEM-EDX. The precipitation process was obtained by adding NaOH as precipitation agent to reduce the concentration of Cu and Fe in the jewelry industry wastewater. The adsorption process was conducted in batch system by varying the dose and the adsorption time. The heavy metal content was analyzed using AAS. Continues adsorption process was obtained to Cu metal based on the optimum metal removal efficiency in the batch system.

Characterization result of commercial activated carbon and rice husks before being used as adsorbents showed a regular and numerous empty pore distribution. Meanwhile, after being used in the adsorption process, the pores got closed and became irregular, hence Cu and Fe metal which had been absorbed in commercial adsorbent and rice husk were found. The removal efficiency of Cu and Fe metals at pH 9 precipitation process reached 99.94% and 99.99%, respectively. While at pH 7, the removal efficiency of Cu and Fe metals were 99.86% and 99.99%, respectively. The maximum adsorption capacity of commercial adsorbent and rice husk in the removal of Cu metals were 0.1845 mg/g and 0.0012 mg/g (40-50 mesh size), respectively. Isotherm and adsorption kinetics according to the maximum absorption capacity of Cu metal referred to the Freundlich model-pseudo second order. Continues adsorption of Cu metal followed Thomas model with KTh value -0,000058 ml/mg.min and q₀ 27,396 mg/g.

Keywords: Adsorption, Cu, industrial wastewater, precipitation, rice husk

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa karena atas rahmat dan berkat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis yang berjudul “Penurunan Kadar Logam Tembaga dan Besi Pada Limbah Cair Industri Perhiasan Emas Menggunakan Karbon Aktif Melalui Proses Presipitasi dan Adsorpsi.”. Penyelesaian tesis ini tidak lepas dari bantuan, saran, masukan serta bimbingan dari berbagai pihak, baik secara moril maupun materi. Dengan selesainya tesis ini tidak lupa penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada:

1. Bapak Dr. Ali Masduqi, S.T, M.T. sebagai dosen pembimbing yang telah mengarahkan dan memberikan masukan dalam penyusunan tesis ini.
2. Bapak Prof. Wahyono Hadi, M.Sc, Ph.D, Bapak Dr. Ir. Agus Slamet, M.Sc dan Ibu Dr. Ir. Ellina Sitepu Pandebesie, M.T. sebagai dosen penguji yang telah memberikan banyak masukan.
3. Ibu Dr. Ir. Ellina Sitepu Pandebesie, M.T. selaku dosen wali serta Bapak dan Ibu Laboran Jurusan Teknik Lingkungan yang telah membantu.
4. Keluarga yang telah memberikan semangat dan doa sehingga penulis dapat menyelesaikan proses perkuliahan serta tesis ini dengan baik.
5. Lembaga Pengelola Dana Pendidikan (LPDP) Kementerian Keuangan Republik Indonesia, atas dukungan finansial selama menempuh studi magister dan penelitian.
6. Teman-teman angkatan 2016, teman-teman S2 serta adik-adik S1 yang telah membantu, memberikan saran dan dukungan kepada penulis.

Demikian laporan tesis ini telah disusun oleh penulis. Segala saran sangat diharapkan agar penulisan laporan tesis ini menjadi lebih baik. Semoga dapat bermanfaat bagi penulis dan siapa saja yang membacanya.

Surabaya, Juli 2018

Penulis

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN PENGESAHAN	i
ABSTRAK.....	iii
ABSTRACT.....	v
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR TABEL.....	xi
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan	3
1.4 Ruang Lingkup.....	4
1.5 Manfaat	4
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Pencemaran Logam dalam Perairan.....	5
2.2 Presipitasi	6
2.3 Adsorpsi	9
2.3.1 Isoterm Adsorpsi	13
2.3.2 Kinetika Adsorpsi	14
2.4 Kinetika Adsorpsi Proses Kontinyu	15
2.5 Karbon Aktif	17
2.6 Penelitian Terdahulu	18
BAB 3 METODE PENELITIAN.....	21
3.1 Ide Penelitian	23
3.2 Tujuan dan Manfaat	23
3.3 Studi Literatur	23
3.4 Variabel dan Parameter.....	24
3.5 Persiapan Penelitian	24
3.5.1 Perizinan	24
3.5.2 Persiapan Reaktor	25
3.5.3 Persiapan Sampel dan Material Adsorben	26
3.6 Pelaksanaan Penelitian.....	26
3.6.1 Pengambilan Limbah Cair di TP.X Surabaya.....	26
3.6.2 Analisis Karakteristik Awal Limbah Cair Industri	26
3.6.3 Persiapan dan Pembuatan Adsorben Karbon Aktif	27
3.6.4 Karakterisasi Adsorben dengan SEM-EDX	28
3.6.5 Proses Presipitasi	28
3.6.6 Proses Adsorpsi secara <i>Batch</i>	29
3.7 Analisis Data.....	30
3.7.1 Analisis Karakteristik Adsorben Karbon Aktif	30
3.7.2 Analisis Karakteristik Limbah Cair Industri.....	30
3.7.3 Analisis Model Isoterm dan Kinetika Adsorpsi.....	30

3.7.4	Analisis Kapasitas Adsorpsi Logam Secara Kontinyu	30
3.8	Pembahasan	31
3.9	Kesimpulan dan Saran	31
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN.....		33
4.1	Karakteristik Awal Limbah Cair Industri PT. X Surabaya.....	33
4.2	Proses Presipitasi	34
4.3	Proses Adsorpsi.....	37
4.3.1	Pengaruh Dosis Adsorben.....	38
4.3.2	Pengaruh Waktu Kontak.....	40
4.3.3	Isoterm Adsorpsi secara Batch	41
4.3.4	Kinetika Adsorpsi secara Batch.....	44
4.3.5	Adsorpsi Kontinyu	45
4.4	Karakterisasi Morfologi Permukaan Adsorben Karbon Aktif dengan Analisis SEM-EDX	49
4.4.1	Analisis SEM Karbon Aktif Komersial	50
4.4.2	Analisis EDX Karbon Aktif Komersial	52
4.4.3	Analisis SEM Karbon Aktif Sekam Padi.....	54
4.4.4	Analisis EDX Karbon Aktif Sekam Padi.....	57
BAB 5 PENUTUP		61
5.1	Kesimpulan	61
5.2	Saran	61
DAFTAR PUSTAKA.....		63
LAMPIRAN-LAMPIRAN		69

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Penelitian Terdahulu	18
Tabel 4. 1 Karakteristik Limbah Awal Sebelum Proses Pengolahan	33
Tabel 4. 2 Pengaruh pH Terhadap Penyisihan Logam Cu dan Fe	36
Tabel 4. 3 Konsentrasi Logam Setelah Proses Adsorpsi Berdasarkan Variasi Dosis Adsorben.....	38
Tabel 4. 4 Konsentrasi Logam Setelah Proses Adsorpsi Berdasarkan Variasi Waktu Kontak	40
Tabel 4. 5 Hasil Analisis Isoterm Adsorpsi Cu^{2+} dan Fe^{2+} menggunakan KAK dan SP.....	42
Tabel 4. 6 Hasil Analisis Model Kinetika Adsorpsi Orde Satu Semu dan Orde Dua Semu.....	44
Tabel 4. 7 Hasil Uji EDX Karbon Aktif Komersial	54
Tabel 4. 8 Hasil Uji EDX Karbon Aktif Sekam Padi	59

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1	Kurva kelarutan logam.....	7
Gambar 2. 2	Mekanisme adsorpsi karbon aktif	11
Gambar 2. 3	Kurva <i>breakthrough</i> pada adsorpsi sistem kontinyu	15
Gambar 3.1	Kerangka penelitian	21
Gambar 3.2	Reaktor kolom adsorpsi kontinyu	25
Gambar 4.1	Perubahan pada prose presipitasi	35
Gambar 4.2	Grafik kapasitas penyerapan maksimum adsorben karbon aktif (Hasil Analisis)	39
Gambar 4. 3	Grafik Efisiensi penyisihan Cu pada sistem kontinyu	46
Gambar 4. 4	Grafik model Thomas	47
Gambar 4. 5	Grafik model Bohart-Adam	48
Gambar 4. 6	Kurva <i>breakthrough</i>	49
Gambar 4.7	Karbon aktif komersial	50
Gambar 4. 8	Mikrograf SEM karbon aktif komersial.....	50
Gambar 4. 9	Mikrograf SEM karbon aktif komersial sebelum dan setelah digunakan	51
Gambar 4. 10	Spektra EDX karbon aktif komersial	53
Gambar 4. 11	Karbon aktif sekam padi	55
Gambar 4. 12	Mikrograf SEM karbon sekam padi sebelum aktivasi.....	55
Gambar 4. 13	Mikrograf SEM karbon aktif sekam padi setelah aktivasi.....	55
Gambar 4. 14	Mikrograf SEM karbon aktif sekam padi sebelum dan setelah digunakan	56
Gambar 4.15	Mikrograf SEM karbon aktif sekam padi sebelum dan setelah digunakan	56
Gambar 4. 16	Spektra EDX karbon aktif sekam padi.....	58

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Penurunan kualitas air sungai disebabkan oleh pembuangan limbah industri yang melebihi baku mutu. Logam Cu dan Fe adalah jenis logam berat pencemar perairan yang terkandung dalam limbah cair industri. Logam tersebut merupakan logam berat yang banyak digunakan dalam berbagai industri. Industri perhiasan emas merupakan salah satu industri yang menggunakan logam Cu dan Fe dalam proses produksinya sehingga menghasilkan limbah asam pekat dengan kadar logam Cu dan Fe yang cukup tinggi. Menurut Rajagukguk (2018), pengolahan limbah cair industri perhiasan emas PT. X Surabaya masih mengeluarkan bau asam yang dirasakan oleh warga sekitar. Logam berat menjadi perhatian utama dalam pencemaran perairan karena toksisitas dan jumlahnya yang berlimpah akibat penggunaannya yang cukup luas. Cemarannya tersebut membahayakan mikroorganisme dan lingkungannya baik dalam bentuk larutan, koloid maupun bentuk partikel lainnya (Darmono, 2001).

Pencemaran perairan akibat logam berat dapat diketahui tidak hanya dari kandungan limbah cair buangan industri tetapi dapat juga berdasarkan pengamatan terhadap kualitas air, sedimen serta biota perairan. Beberapa kasus pencemaran perairan akibat logam berat yang terjadi di sekitar perairan Surabaya telah melebihi baku mutu yang dipersyaratkan. Pencemaran logam Cu ditemukan di Perairan Pesisir Wonorejo, Pantai Timur Surabaya dengan kadar Cu rata-rata sebesar $0,080 \pm 0,010$ mg/l. Nilai tersebut juga berada di atas baku mutu air laut untuk biota laut (Sari dkk., 2017). Logam Cu ditemukan dalam sedimen pada Pantai Kenjeran Surabaya dengan kadar sebesar 19.1269 sampai 30.7187 mg/kg (Hutomo dkk., 2016). Kandungan logam Cu yang melebihi baku mutu, cepat atau lambat dapat membahayakan kehidupan organisme setempat bahkan manusia bila mengkonsumsi komoditi di perairan tersebut.

Mengingat penting dan besarnya dampak yang ditimbulkan bagi lingkungan maka diperlukan suatu pengolahan yang tepat sebelum efluen limbah

tersebut dibuang ke lingkungan. Beberapa teknologi atau metode seperti presipitasi, adsorpsi, filtrasi (penyaringan), *reverse osmosis* dan pertukaran ion telah digunakan untuk menghilangkan polutan logam dari air (Lata dan Samadder, 2014). Berdasarkan pertimbangan biaya pengolahan, kemudahan dan efektifitas dalam proses pengoperasian, metode presipitasi dan adsorpsi menjadi kombinasi teknik pengolahan yang sering digunakan untuk mengurangi kandungan logam berat dalam limbah cair industri sesuai baku mutu. Proses presipitasi menggunakan agen presipitan mampu menurunkan kadar logam berat dalam limbah industri mencapai lebih dari 80% (Adli, 2012). Penambahan agen presipitan akan mengendapkan logam berat yang kemudian dapat dipisahkan secara fisik sehingga diperoleh air limbah hasil olahan dengan kadar logamnya telah berkurang.

Adsorpsi telah terbukti ekonomis dan efisien untuk menghilangkan logam berat seperti Cd, Pb, Cr, Cu, Ni dan Zn dari limbah cair industri (Karnib dkk., 2014). Sampai saat ini teknik adsorpsi dengan menggunakan berbagai macam adsorben masih merupakan metode yang paling menguntungkan karena efektifitas dan kapasitas adsorpsinya yang tinggi serta biaya operasionalnya yang rendah. Beberapa adsorben seperti karbon aktif, silika dan *graphene* dapat digunakan dalam penyisihan polutan baik organik maupun anorganik pada lingkungan perairan. Menurut Asuquo dkk. (2017) luas permukaan karbon aktif berkisar antara 500 sampai 1500 m²/g sehingga menjadikan karbon aktif sangat efisien untuk digunakan dalam proses adsorpsi. Proses presipitasi merupakan pengolahan primer yang dibutuhkan untuk mengurangi beban pencemar pada proses selanjutnya seperti adsorpsi. Penelitian Adli (2012), dengan menggunakan metode presipitasi dan adsorpsi dapat mengendapkan 97,54% logam Cu sementara adsorpsi dengan karbon aktif dapat menyerap logam berat sebanyak 36,60%.

Sekam padi merupakan limbah pertanian yang berpotensi sebagai alternatif adsorben karena terdapat kandungan gugus fungsi seperti karboksil dan hidroksil (Mullick dkk., 2017; Alexander dkk., 2017) yang merupakan gugus aktif dalam proses adsorpsi. Dengan aktivasi kimia menggunakan larutan asam akan memperbesar pori karbon sehingga proses adsorpsi akan lebih efektif. Masalah penggunaan sekam padi sebagai adsorben umumnya dikarenakan daya serapnya

yang rendah sehingga perlu diaktivasi untuk meningkatnya daya serapnya. Kekurangan proses aktivasi dengan pembakaran akan mengurangi 12,2% dari massanya pada saat pembakaran, sehingga membutuhkan lebih banyak sekam padi. Proses aktivasi juga dapat dilakukan dengan perendaman menggunakan bahan kimia akan tetapi kekurangannya adalah harga bahan kimia yang cukup mahal. Penelitian Wirani (2017) menunjukkan kapasitas adsorpsi sekam padi aktivasi fisika-kimia sebesar 0,56731 mg/g dengan persentase adsorpsi 54,85%.

Banyak penelitian tentang variasi jenis aktivasi terhadap sekam padi telah dilakukan untuk melihat efektivitasnya dalam proses adsorpsi, tapi masih sedikit penelitian yang membandingkan penggunaan adsorben komersial dan adsorben sekam padi pada kondisi sistem yang sama. Oleh karena itu dilakukan penelitian untuk membandingkan efektivitas kedua jenis adsorben ini dengan memperlihatkan bagaimana pengaruh perbandingan ukuran partikel terhadap luas permukaan adsorben serta dosis adsorben yang merupakan faktor penting untuk melihat kemampuan adsorpsi suatu adsorben.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian dalam latar belakang maka rumusan masalah yang diambil yaitu :

1. Bagaimana kemampuan penyisihan logam berat Cu dan Fe pada efluen limbah cair industri dengan proses presipitasi dan adsorpsi?
2. Bagaimana isoterm dan kinetika adsorpsi dengan menggunakan adsorben karbon aktif?
3. Bagaimana kemampuan penyisihan logam Cu menggunakan adsorben karbon aktif pada sistem kontinyu?

1.3 Tujuan

1. Mengkaji kemampuan penyisihan logam berat Cu dan Fe pada limbah cair industri perhiasan emas dengan proses presipitasi dan adsorpsi.
2. Mengkaji isoterm dan kinetika adsorpsi dengan menggunakan adsorben karbon aktif.
3. Mengkaji kemampuan penyisihan logam Cu menggunakan adsorben karbon aktif pada sistem kontinyu.

1.4 Ruang Lingkup

1. Sampel limbah yang digunakan adalah limbah cair dari PT. X Surabaya.
2. Logam yang dianalisis adalah logam Cu dan Fe.
3. Proses presipitasi dilakukan dengan pengadukan cepat yaitu 120 rpm selama satu menit, lalu dilanjutkan dengan pengadukan lambat 45 rpm selama 20 menit
4. Jenis adsorben yang digunakan adalah karbon aktif sekam padi dan karbon aktif komersial.
5. Ukuran partikel adsorben yang digunakan adalah 10-20 *mesh* dan 40-50 *mesh*.
6. Variasi dosis adsorben dan waktu kontak pada proses adsorpsi secara *batch* yaitu 0,5 g, 1,0 g, 1,5 g, 2,0 g dan 0,5 jam, 1 jam, 2 jam, 4 jam.
7. Penelitian dilakukan dalam skala laboratorium dengan sistem *batch* lalu dilanjutkan dengan sistem kontinyu setelah diperoleh kondisi optimum proses adsorpsi.
8. Sistem kontinyu untuk menyisihkan logam Cu.

1.5 Manfaat

1. Memberikan informasi penyisihan logam Cu dan Fe dalam limbah cair industri yang menggunakan logam dalam proses produksinya.
2. Memberikan informasi kapasitas pengolahan limbah cair industri dengan adsorpsi menggunakan karbon aktif sekam padi dan karbon aktif komersial.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pencemaran Logam dalam Perairan

Logam berat merupakan salah satu bahan yang digunakan dalam proses produksi berbagai industri seperti industri perhiasan emas, pengolahan biji besi, pembersihan karat, pertambangan, industri baterai, galvanis, cat serta tinta (Palar, 2012). Industri yang menggunakan logam berat dalam proses produksinya akan menghasilkan limbah berupa ion logam berat seperti kromium (Cr), tembaga (Cu), cobalt (Co), merkuri (Hg), arsenik (As), seng (Zn), nikel (Ni), timbal (Pb), besi (Fe) dan kadmium (Cd), sesuai jenis logam yang digunakan pada industri tersebut (Fang dkk., 2018). Logam digolongkan sebagai logam berat (*heavy metal*) bila beratnya mencapai 5 g atau lebih pada tiap 1 cm³, sehingga dapat dikatakan bahwa logam berat memiliki berat 5 kali lebih besar dari berat air (Darmono, 2001). Keberadaan logam berat dalam lingkungan perairan perlu diperhatikan karena sifat racun yang dimilikinya.

Beberapa kasus pencemaran perairan akibat logam berat yang terjadi di Indonesia telah melebihi baku mutu maksimal yang dipersyaratkan. Di Sungai Surabaya ditemukan kadar logam Cu pada air sebesar 0,37-0,81 mg/l dan pada sedimen 27,58-77,29 mg/kg massa kering (Fitriyah dkk., 2016). Kandungan logam berat Cu dan Fe juga ditemukan pada terumbu karang di Perairan Pulau Panjang, Jepara dengan kadar logam Cu sebesar 0,41 mg/l dan Fe berkisar antara 5,25 mg/l-30,56 mg/l (Susiati dkk., 2015) dimana melebihi baku mutu (Kep. Men LH No. 51 Tahun 2004). Logam dianggap sebagai masalah serius karena bersifat toksik jika terdapat dalam jumlah besar. Selain bersifat racun, logam di perairan dapat terakumulasi dalam sedimen dan organisme. Tingkat pencemaran logam di perairan dapat diketahui dengan melakukan pemantauan kualitas perairan secara periodik dan berkesinambungan serta membandingkannya dengan baku mutu air.

Keberadaan logam berat di perairan sangat berbahaya bagi kehidupan organisme dan memberikan efeknya secara tidak langsung terhadap kesehatan manusia. Hal ini berkaitan dengan sifat-sifat logam berat (Darmono, 2001) yaitu :

1. Sulit didegradasi, sehingga mudah terakumulasi dalam lingkungan perairan dan keberadaannya secara alami sulit terurai (dihilangkan).
2. Dapat terakumulasi dalam organisme termasuk kerang dan ikan yang akan membahayakan kesehatan manusia apabila mengkonsumsi organisme tersebut.
3. Mudah terakumulasi di sedimen sehingga konsentrasinya selalu lebih tinggi dari konsentrasi logam dalam air. Sedimen mudah tersuspensi karena pergerakan air akan melarutkan kembali logam yang dikandungnya ke dalam air, sehingga sedimen dapat menjadi sumber pencemar potensial dalam skala waktu tertentu.

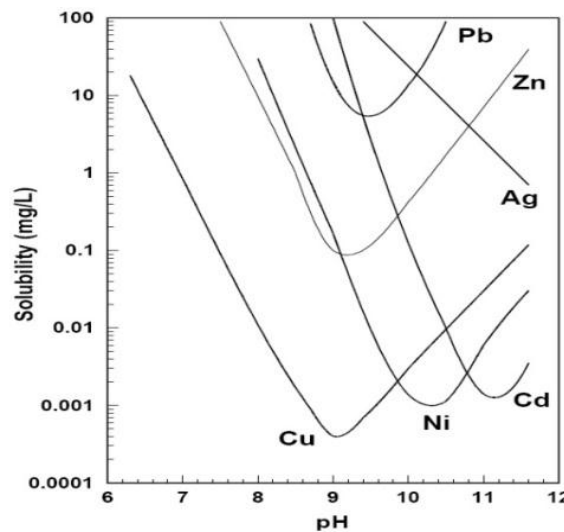
Pada lingkungan perairan, logam berada dalam bentuk ion-ion bebas, pasangan ion organik dan ion kompleks. Kelarutan logam dalam air dipengaruhi oleh pH air. Kenaikan pH air akan menurunkan logam dalam air karena kenaikan pH mengubah kestabilan dari bentuk karbonat menjadi hidroksida yang membentuk ikatan dengan partikel pada air, sehingga akan mengendap membentuk lumpur (Palar, 1994). Kehadiran logam-logam dalam perairan berasal dari sumber alamiah dan dari aktivitas manusia. Sumber logam alamiah yang masuk dalam badan perairan berupa pengikisan batu mineral yang banyak di perairan dan partikel-partikel di udara yang terbawa saat hujan. Sumber logam pencemar dari aktivitas manusia umumnya berasal kegiatan industri yang menggunakan logam dalam proses produksi serta penggunaan bahan kimia dalam kegiatan pertanian.

Faktor fisik dan kimia perairan berpengaruh pada kelarutan logam berat di perairan. Konsentrasi logam berat yang terlarut dalam air sangat tergantung pada keadaan perairan tersebut dimana semakin banyak aktivitas manusia baik di darat maupun di pantai akan mempengaruhi konsentrasi logam berat dalam perairan.

2.2 Presipitasi

Presipitasi merupakan salah satu proses kimia-fisik yang dapat digunakan dalam pengolahan limbah cair. Dalam pengolahan air, presipitasi kimia yang paling umum adalah dalam proses koagulasi-flokulasi dengan penambahan

koagulan agar terbentuk yang yang mudah mengendap. Pada proses kimia-fisik dilakukan dalam tiga tahapan proses yaitu proses reduksi, proses presipitasi (pembentukan partikel hidroksida) dan proses pengendapan (pemisahan partikel hidroksida). Logam-logam berat biasanya diendapkan sebagai hidroksida dengan penambahan kapur atau kaustik soda (NaOH) pada suatu nilai pH dimana terjadi kelarutan yang minimum. Kelarutan logam berbeda-beda tergantung pada pH seperti pada Gambar 2.1.



Gambar 2. 1 Kurva kelarutan logam (Wentz, 1995).

Prinsip reaksi presipitasi kimia adalah reaksi oksidasi-reduksi yang membutuhkan kondisi lingkungan (pH, pengadukan, temperatur dan konsentrasi) tertentu. Proses presipitasi optimum dapat dicapai dengan pengaturan kondisi-kondisi yang saling berkaitan dan mempengaruhi proses tersebut, seperti :

a. Temperatur

Apabila temperatur menurun maka viskositas air akan meningkat sehingga kecepatan pengendapan flok akan menurun. Proses koagulasi-flokulasi lebih mudah dilakukan pada temperatur tinggi daripada temperatur rendah, karena viskositas air pada temperatur tinggi lebih rendah daripada viskositas air pada temperatur rendah.

b. pH

Rentang pH dalam proses presipitasi dipengaruhi oleh jenis dan konsentrasi agen presipitat serta komposisi air yang akan diolah. Presipitasi akan berjalan baik bila berada pada rentang pH optimum.

c. Jenis agen presipitat

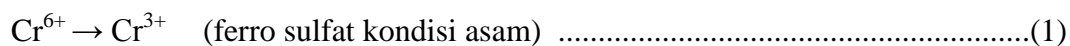
Pemilihan jenis agen presipitat pada proses pengolahan seharusnya didasarkan pada penelitian perbandingan performa agen presipitat dan setelah itu baru dilihat dari segi ekonominya.

d. Pengadukan

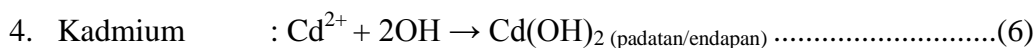
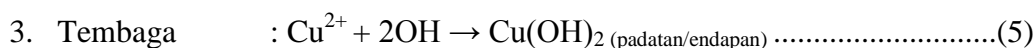
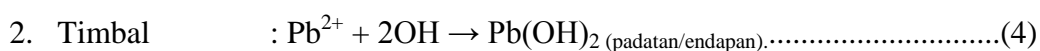
Pengaturan kondisi pengadukan sangat penting untuk mencapai proses presipitasi sempurna. Pencampuran agen presipitat harus merata sehingga dapat bereaksi dengan partikel-partikel atau ion-ion lain dalam suspensi. Selain itu pengadukan yang terlalu lamban mengakibatkan waktu pembentukan flok menjadi lama dan sebaliknya bila pengadukan terlalu cepat maka flok-flok yang telah terbentuk akan pecah kembali.

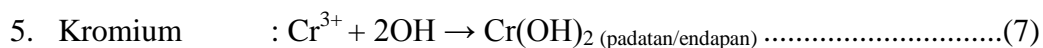
Pada pengolahan dengan proses kimia-fisik diperlukan proses reduksi karena dalam air limbah industri elektroplating mengandung ion kromium valensi VI yang sulit diendapkan dalam bentuk hidroksida. Proses reduksi ion kromium valensi VI akan menjadi ion kromium valensi III yang mudah diendapkan dalam bentuk hidroksida. Pada umumnya bahan reduksi yang digunakan adalah ferro sulfat.

Mekanisme reduksi ion kromium valensi VI menjadi ion kromium valensi III sebagai berikut:



Mekanisme reaksi-reaksi logam berat dengan ion hidroksida seperti berikut (Sumada, 2006):





Besi ditemukan dalam bentuk kation ferro (Fe^{2+}) dan ferri (Fe^{3+}). Pada perairan alami dengan pH 7 dan kadar oksigen terlarut yang cukup, ion ferro yang bersifat mudah larut dioksidasi menjadi ion ferri. Pada oksidasi ini terjadi pelepasan elektron. Sebaliknya, pada reduksi ferri menjadi ferro terjadi penangkapan elektron. Proses oksidasi dan reduksi besi tidak melibatkan oksigen dan hidrogen (Eckenfelder, 1989). Pada pH 7,5-7,7 ion ferri mengalami oksidasi dan berikatan dengan hidroksida membentuk $\text{Fe}(\text{OH})_3$ yang bersifat tidak larut dan mengendap (presipitasi) di dasar perairan, membentuk warna kemerahan pada substrat dasar. Oleh karena itu, besi hanya ditemukan pada perairan yang berada dalam kondisi anaerob (anoksik) dan suasana asam (Palar, 2012).

Pembentukan hidroksida dipengaruhi oleh waktu pengadukan dan kecepatan putaran pengaduk. Proses presipitasi merupakan proses yang dapat diterapkan pada pengolahan limbah terutama dalam tahapan untuk menghilangkan kandungan logam berat atau senyawa ortofosfat dalam air limbah.

2.3 Adsorpsi

Adsorpsi merupakan suatu gejala permukaan dimana terjadi penyerapan atau penarikan molekul-molekul gas atau cairan pada permukaan adsorben (Yun dkk., 2001). Pada mekanisme adsorpsi zat cair atau gas yang terikat pada zat padat disebut adsorbat, sedangkan zat padat yang dapat mengikat atau menyerap disebut adsorben. Adsorpsi logam berat terjadi karena adanya interaksi antara gugus fungsi aktif dari adsorben, sehingga struktur kimia dari adsorben sangat mempengaruhi proses adsorpsi.

Benefield dkk. (1982) mengklasifikasikan adsorpsi menjadi 2 jenis yaitu adsorpsi fisik dan kimia. Adsorpsi fisik terjadi karena adanya gaya van der Waals dan terjadi bolak-balik (reversibel). *Solute* akan diserap pada permukaan adsorben bila interaksi gaya antar molekul dari *solute* (zat yang dilarutkan) dan adsorben lebih besar daripada gaya atraksi antara *solute* dan *solvent*. Contoh adsorpsi fisik yaitu adsorpsi oleh karbon aktif. Adsorpsi kimia adalah adsorpsi yang melibatkan ikatan valensi sebagai hasil pemakaian bersama elektron oleh adsorbat dan adsorben. Adsorpsi kimia berkaitan dengan pembentukan senyawa kimia yang

melibatkan adsorben pada permukaan zat yang diserap. Adsorbat yang teradsorpsi oleh proses kimia biasanya sangat sulit untuk diregenerasi (Trisnawati, 2008).

Daya adsorpsi suatu adsorben juga dipengaruhi oleh porositas adsorben. Semakin besar porositas suatu adsorben maka semakin besar pula kemampuan penyerapannya sehingga penyisihan logam dalam sampel semakin besar. Persentase penyisihan logam (% R) dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (1) sedangkan kapasitas penyerapannya (mg/g) dihitung menggunakan persamaan (2).

$$\% R = \frac{C_o - C_t}{C_o} \times 100 \dots\dots\dots(8)$$

$$qt = \frac{(C_o - C_t)V}{D} \dots\dots\dots(9)$$

Dimana:

Co : konsentrasi awal sebelum adsorpsi (mg/l)

Ct : konsentrasi setelah adsorpsi (mg/l)

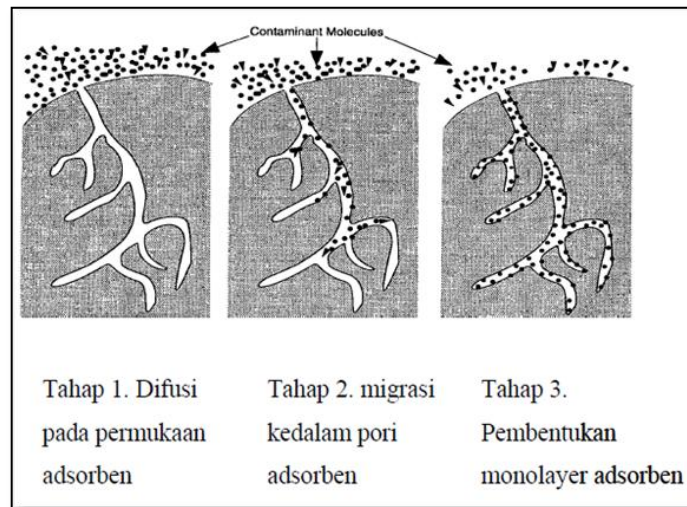
D : dosis adsorben yang digunakan (g)

V : volume larutan (L)

qt : kapasitas penyerapan (mg/g)

Proses adsorpsi karbon aktif mengikuti mekanisme adsorpsi berdasarkan ilustrasi (Gambar 2.2) yang terdiri atas tiga tahapan (Benefield dkk., 1982) yaitu :

1. Fase *bulk* transfer yaitu perpindahan molekul yang akan diadsorpsi menuju ke permukaan partikel adsorben. Selanjutnya terjadi film difusi yaitu difusi adsorbat melalui suatu lapisan film yang akan mengelilingi partikel adsorben.
2. Difusi pori yaitu molekul adsorbat dipindahkan dari permukaan partikel menuju ke dalam pori adsorben.
3. Partikel menempel pada permukaan adsorben.



Gambar 2. 2 Mekanisme adsorpsi karbon aktif (Reynold dan Richard, 1996)

Bila kapasitas adsorpsi masih sangat besar, sebagian akan teradsorpsi terikat di permukaan, namun bila permukaan sudah jenuh atau mendekati jenuh dengan adsorbat, maka dapat terbentuk lapisan adsorpsi kedua dan seterusnya di atas adsorbat yang telah terikat pada permukaan.

Beberapa faktor yang mempengaruhi daya serap adsorpsi di antaranya (Bahl dkk., 1997) yaitu:

1. Sifat adsorben

Adsorpsi secara umum terjadi pada semua permukaan, namun besarnya ditentukan oleh luas permukaan adsorben yang kontak dengan adsorbat. Luas permukaan adsorben sangat berpengaruh terhadap proses adsorpsi. Adsorpsi merupakan suatu kejadian permukaan sehingga besarnya adsorpsi sebanding dengan luas permukaan. Semakin banyak permukaan yang kontak dengan adsorbat maka akan semakin besar pula adsorpsi yang terjadi.

2. Konsentrasi adsorbat

Konsentrasi adsorbat yang digunakan akan sangat mempengaruhi proses adsorpsi yang terjadi. Semakin tinggi konsentrasi adsorbat maka akan semakin rendah persen removalnya.

3. Sifat serapan

Adsorpsi akan bertambah besar sesuai dengan bertambahnya ukuran molekul serapan dari struktur yang sama. Adsorpsi juga dipengaruhi oleh gugus

fungsi, posisi gugus fungsi, ikatan rangkap, struktur rantai dari senyawa serapan (adsorbat).

4. Temperatur

Faktor yang mempengaruhi temperatur proses adsorpsi adalah viskositas dan stabilitas termal senyawa serapan. Jika pemanasan tidak mempengaruhi sifat-sifat senyawa serapan, seperti terjadi perubahan warna maupun dekomposisi, maka perlakuan dilakukan pada titik didihnya. Untuk senyawa volatil, adsorpsi dilakukan pada temperatur kamar atau bila memungkinkan pada temperatur lebih kecil.

5. pH (derajat keasaman)

Untuk asam-asam organik adsorpsi akan meningkat bila pH diturunkan, yaitu dengan penambahan asam-asam mineral. Hal ini disebabkan karena kemampuan asam mineral untuk mengurangi ionisasi asam organik tersebut. Sebaliknya bila pH asam organik dinaikkan, yaitu dengan menambahkan alkali, adsorpsi akan berkurang sebagai akibat terbentuknya garam.

6. Waktu kontak

Suatu adsorben yang ditambahkan ke dalam suatu cairan membutuhkan waktu untuk mencapai kesetimbangan. Waktu yang dibutuhkan berbanding terbalik dengan jumlah adsorben yang digunakan. Selain ditentukan oleh dosis adsorben, pengadukan juga mempengaruhi waktu singgung. Pengadukan dimaksudkan untuk memberi kesempatan pada partikel adsorben untuk bersinggungan dengan senyawa serapan. Untuk larutan yang mempunyai viskositas tinggi, dibutuhkan waktu singgung yang lebih lama.

7. Agitasi

Jika agitasi yang terjadi antara partikel karbon dengan cairan relatif kecil, permukaan film dari liquid sekitar partikel akan menjadi tebal dan difusi film akan terbatas.

Proses aktivasi adsorben merupakan hal penting disamping bahan baku yang digunakan. Aktivasi adsorben yaitu suatu modifikasi adsorben yang bertujuan untuk meningkatkan kapasitas dan efisiensi adsorpsi dari adsorben. Modifikasi dapat dilakukan dengan perlakuan kimia seperti direaksikan dengan

asam atau basa dan perlakuan fisika seperti pemanasan dan pencucian (Marshall dan Mitchell, 2014).

2.3.1 Isoterm Adsorpsi

Isoterm adsorpsi menunjukkan hubungan ekuilibrium antara konsentrasi larutan dan jumlah adsorbat yang diserap pada suhu konstan. Beberapa model isoterm adsorpsi yang telah ada yaitu : isoterm adsorpsi Freundlich, Langmuir dan Brunauer-Emmet-Teller (BET) (El-Moselhy dkk., 2017). Adsorpsi ion atau molekul pada permukaan karbon aktif umumnya terbatas pada lapisan *monolayer* sehingga proses adsorpsi biasanya mengikuti persamaan adsorpsi Freundlich dan/atau Langmuir (Alexander dkk., 2017).

Model isoterm Freundlich banyak digunakan pada proses adsorpsi dalam air minum maupun air limbah (Reynold dan Richard, 1996) dengan asumsi bahwa adsorpsi terjadi secara fisika. Model isoterm Freundlich mampu menggambarkan adsorpsi senyawa organik dan anorganik pada rentang yang luas untuk berbagai adsorben. Persamaan isoterm Freundlich seperti pada persamaan (10) dan (11) (Reynold dan Richard, 1996).

$$q_e = \frac{x}{m} = K_f C_e^{1/n} \dots\dots\dots(10)$$

Persamaan (10) dapat ditulis dalam bentuk persamaan (11) sebagai berikut :

$$\log q_e = \log K_f + \frac{1}{n} \log C_e \dots\dots\dots(11)$$

dimana:

q_e : jumlah adsorbat yang diserap setiap gram adsorben (mg/g)

C_e : konsentrasi adsorbat pada waktu ekuilibrium (mg/l)

K_f : konstanta Freundlich

n : homogenitas permukaan

Model isoterm Langmuir mengasumsikan bahwa jumlah permukaan yang dapat menampung adsorbat bersifat tetap, sesuai dengan luas permukaan adsorben dan reversibel. Kesetimbangan tercapai pada saat kecepatan adsorpsi molekul ke permukaan adsorben sama dengan kecepatan desorpsi molekul dari permukaan adsorben. Persamaan isoterm Langmuir seperti pada persamaan (12) dan (13) (Reynold dan Richard, 1996).

$$q_e = \frac{x}{m} = \frac{q_{maks} K_L C_e}{1 + K_L C_e} \dots\dots\dots(12)$$

Persamaan (12) dapat ditulis dalam bentuk persamaan (13) sebagai berikut :

$$\frac{1}{x/m} = \frac{1}{q_{maks} K_L} \frac{1}{C_e} + \frac{1}{q_{maks}} \dots\dots\dots(13)$$

dimana :

q_e : jumlah adsorbat yang diserap setiap gram adsorben (mg/g)

C_e : konsentrasi adsorbat pada waktu ekuilibrium (mg/l)

K_L : konstanta Langmuir

Q_{maks} : jumlah adsorbat maksimum yang dapat diserap setiap gram adsorben (mg/g)

2.3.2 Kinetika Adsorpsi

Kinetika adsorpsi menggambarkan kecepatan penyisihan zat terlarut (adsorbat) yang berkaitan dengan waktu kontak antara adsorben dan adsorbat. Menurut Hammed dan Ahmad (2012), model yang banyak digunakan dalam studi kinetika adsorpsi yaitu kinetika orde satu semu dan kinetika orde dua semu. Kinetika orde satu semu mengasumsikan bahwa zat terlarut hanya terserap membentuk satu lapisan pada permukaan adsorben. Pada kinetika orde dua semu zat terlarut terikat dan membentuk dua lapisan pada permukaan adsorben. Kedua model tersebut biasanya digunakan dalam kajian untuk mengetahui kinetika adsorpsi logam dan mengukur tingkat adsorpsi menggunakan adsorben dari biomassa (biosorben).

Adapun persamaan kinetika orde satu semu seperti pada persamaan (14) sedangkan orde dua semu seperti pada persamaan (15) (Fang dkk., 2018). Berdasarkan persamaan (14) dapat diperoleh konstanta kecepatan adsorpsi (K_1) dari persamaan regresi linier dengan fungsi $\ln (Q_e - Q_t)$ terhadap t (waktu). Berdasarkan persamaan (15) dapat diperoleh konstanta kecepatan adsorpsi (K_2) dari persamaan regresi linier dengan fungsi t/Q_t terhadap t (waktu) (Benefield dkk., 1982).

$$\log (q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1}{2,303} t \dots\dots\dots(14)$$

$$\frac{t}{qt} = \frac{1}{K_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \dots\dots\dots(15)$$

dimana :

q_e : kapasitas adsorpsi ion logam pada kesetimbangan (mg/g)

q_t : jumlah ion yang terserap pada waktu t (mg/g)

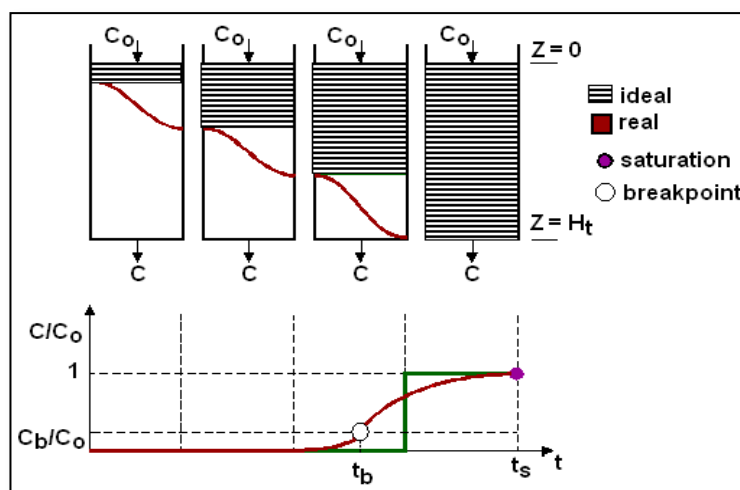
K_1 : konstanta kinetika orde satu semu (menit^{-1})

K_2 : konstanta kinetika orde dua semu (mg/g menit^{-1})

2.4 Kinetika Adsorpsi Proses Kontinyu

Proses adsorpsi dengan sistem aliran kontinyu umumnya menggunakan kolom adsorpsi yang biasanya terbuat dari pipa PVC (*polyvinyl chloride*) atau akrilik. Pengolahan limbah industri maupun perkotaan dalam jumlah besar menggunakan sistem aliran kontinyu. Proses ini merupakan pendekatan yang lebih baik dalam penerapannya dilapangan karena sistem operasinya selalu mengontakkan adsorben dengan larutan (adsorbat), sehingga media adsorpsi dapat melakukan proses adsorpsi secara optimal sampai jenuh (Hameed dan Ahmad, 2012).

Kinerja kolom adsorpsi digambarkan dengan kurva *breakthrough*. Waktu *breakthrough* dan bentuk kurva *breakthrough* yang dihasilkan merupakan parameter untuk menentukan pola operasi dan respon dinamis dari kolom adsorpsi. Berikut adalah gambar mengenai skema terjadinya proses adsorpsi media adsorben.



Gambar 2. 3 Kurva *breakthrough* pada adsorpsi sistem kontinyu (Ruthven, 1984).

Semakin ke bawah aliran yang terjadi pada zona adsorpsi, konsentrasi larutan (*solute*) pada efluen secara teori akan mencapai nol. Ketika zona adsorpsi mencapai dasar kolom, kualitas efluen larutan akan terbatas dan dimulailah proses *breakthrough* seperti pada Gambar 2.3. Konsentrasi yang diperbolehkan saat mencapai *breakthrough* (C_b) adalah 0,05 dari konsentrasi awal (C_o) sedangkan untuk konsentrasi *exhausted* atau jenuh (C_x) adalah 0,95 dari C_o . Nilai antara C_b dan C_x inilah yang disebut kurva *breakthrough* (Reynold dan Richard, 1996).

Kinetika sistem adsorpsi yang terjadi pada *fixed-bed column* dianalisis dengan model Thomas dan Adams-Bohart. Model Thomas cocok digunakan untuk proses adsorpsi dimana proses tidak dipengaruhi oleh difusi eksternal dan internal. Model ini dinyatakan dengan persamaan linier sebagai berikut :

$$\ln\left(\frac{C_o}{C_t} - 1\right) = \frac{K_{Th} q_o W}{Q} - K_{Th} C_o t \dots\dots\dots(16)$$

dimana :

- K_{Th} : konstanta Thomas (ml/mg.menit)
- q_o : jumlah limbah yang diserap oleh adsorben tiap 1 gram sampel (mg/g)
- C_o : konsentrasi awal influen (mg/l)
- C_t : konsentrasi pada waktu t (mg/l)
- W : massa adsorben (g)
- Q : laju alir (ml/menit)
- t : waktu selam pengaliran (menit) (Reynold dan Richard, 1996).

Model Adams-Bohart merupakan gambaran hubungan C_t/C_o dengan t dan biasanya digunakan untuk proses kontinyu. Model Adams-Bohart cocok digunakan untuk $C/C_o < 0,5$ (pada saat awal adsorpsi). Model ini dinyatakan dengan persamaan berikut.

$$\ln \frac{C_o}{C_t} - 1 = K N_o \frac{x}{v} - K C_o t \dots\dots\dots(17)$$

dimana :

- C_o : konsentrasi awal (mg/l)
- C_t : konsentrasi pada waktu t (mg/l)
- K : konstanta kinetika Bohart-Adams (ml/mg.menit)
- N_o : kapasitas adsorpsi karbon (mg/l)
- X : kedalaman media karbon (cm)

t : waktu kontak kolom (jam)

V : kecepatan aliran limbah melewati kolom. Velocity = laju alir / luas area adsorben (cm/menit) (Benefield dkk., 1982).

2.5 Karbon Aktif

Karbon aktif adalah bahan karbon yang telah mengalami proses karbonisasi untuk meningkatkan porositasnya (Asuquo dkk., 2017). Karbon aktif merupakan salah satu jenis adsorben yang umum digunakan dalam pengolahan limbah cair. Bahan ini mampu mengadsorpsi anion, kation dan molekul dalam bentuk senyawa organik dan anorganik. Karbon aktif juga digunakan sebagai adsorben dalam pengolahan air untuk menyisihkan rasa, bau atau warna yang disebabkan oleh kandungan bahan organik dalam air, produk samping disinfeksi, pestisida dan bahan organik sintesis (Masduqi, 2012).

Kemampuan adsorpsi karbon aktif bersifat selektif, tergantung pada besar atau volume pori-pori dan luas permukaan. Semakin banyak pori-pori pada permukaan karbon aktif maka daya adsorpsinya juga semakin meningkat. Luas permukaan karbon aktif berkisar antara 300-3500 m²/g dan ini yang menyebabkan karbon aktif mempunyai sifat sebagai adsorben.

Penggunaan karbon aktif dalam proses pengolahan air berbeda antara karbon aktif berbentuk bubuk dan butiran. Karbon aktif bubuk biasanya dibubuhkan pada air yang diolah dan diaduk secara merata agar terjadi kontak, lalu diendapkan. Karbon aktif berbentuk butiran, karbon aktif digunakan sebagai media filter dalam sebuah kolom adsorpsi yang dipasang setelah filter pasir konvensional atau disebut *post filtration* (Masduqi, 2012).

Sekam padi merupakan limbah pertanian yang menarik untuk diteliti terkait pemanfaatannya sebagai adsorben karena memiliki nilai gizi rendah. Selain itu, material adsorben tersebut memiliki gugus fungsional seperti karbonil, fenolik, karboksil, hidroksil, imidazol, sulfida, amino, fosfat, sulfat, fenol, karbonil dan amida (Lata dan Samadder, 2014). Kemampuan adsorben membentuk ikatan kimia dengan ion logam menjadi kompleks logam atau khelat dipengaruhi oleh gugus fungsional tersebut.

2.6 Penelitian Terdahulu

Penelitian sebelumnya telah menggunakan biomassa sebagai adsorben dalam penyisihan logam berat dalam larutan. Penelitian terdahulu disajikan dalam Tabel 2.1 yang digunakan sebagai referensi dalam penelitian ini.

Tabel 2. 1 Penelitian Terdahulu

Ringkasan Penelitian	Hasil	Referensi
<ul style="list-style-type: none"> Pengendapan limbah cair laboratorium dengan presipitasi menggunakan natrium hidroksida 1 M (kadar awal Cu 139,35 mg/l) Adsorpsi dengan karbon aktif komersial terhadap limbah hasil presipitasi 	<ul style="list-style-type: none"> Persentase Cu yang terendapkan pada pH 5 : 83,91 % pH 7 : 92,03 % pH 9 : 92,52 % pH 11 : 90,91% Persentase logam Cu teradsorpsi 5 g : 77,26 % 10 g : 87,46 % 15 g : 93,00 % 20 g : ~100% 	Adli, H (2012)
<ul style="list-style-type: none"> Presipitasi limbah cair logam berat dengan NaOH 26,36% w/w. Kadar awal Fe 22,4494 mg/l dan Cu 2,2239 mg/l. 	Setelah presipitasi <ul style="list-style-type: none"> kadar Cu 0,5254 mg/l dan penurunan konsentrasi sebesar 76,37%. Kadar Fe 10,8266 mg/l dan penurunan konsentrasi sebesar 51,77% 	Wilyanda dkk. (2015)
<ul style="list-style-type: none"> Sekam padi dikarbonisasi pada T 500°C selama 150 menit. Lalu direndam HCl 5% dengan rasio karbon dan asam 1:10 (b/v) selama 24 jam. Menyisihkan Pb dengan variasi suhu dan waktu karbonisasi. 	Kondisi optimum diperoleh pada : Suhu karbonasi : 500°C Waktu karbonasi : 120 menit Kapasitas adsorpsi : 0,567 mg/g Efisiensi removal : 54,85%	Hanum dkk. (2017)
<ul style="list-style-type: none"> Membandingkan adsorben komersial dengan sekam padi untuk menyisihkan Cr(IV) dalam limbah artifisial. Memvariasikan pH dan waktu kontak 	Kondisi optimum diperoleh pada : pH : 2 ; dengan persentase penyisihan menggunakan adsorben komersial sebesar 97% sedangkan sekam padi 91%. Waktu kontak : 300 menit ; kapasitas penyerapan dengan menggunakan adsorben komersial sebesar 43,79 mg/g sedangkan sekam padi 34,85 mg/g.	Mullich dkk. (2017)
<ul style="list-style-type: none"> Karbon aktif komersial yang umumnya dipakai dalam 	Waktu optimum penyisihan logam yaitu 30 menit.	Bhatti dkk. (2015)

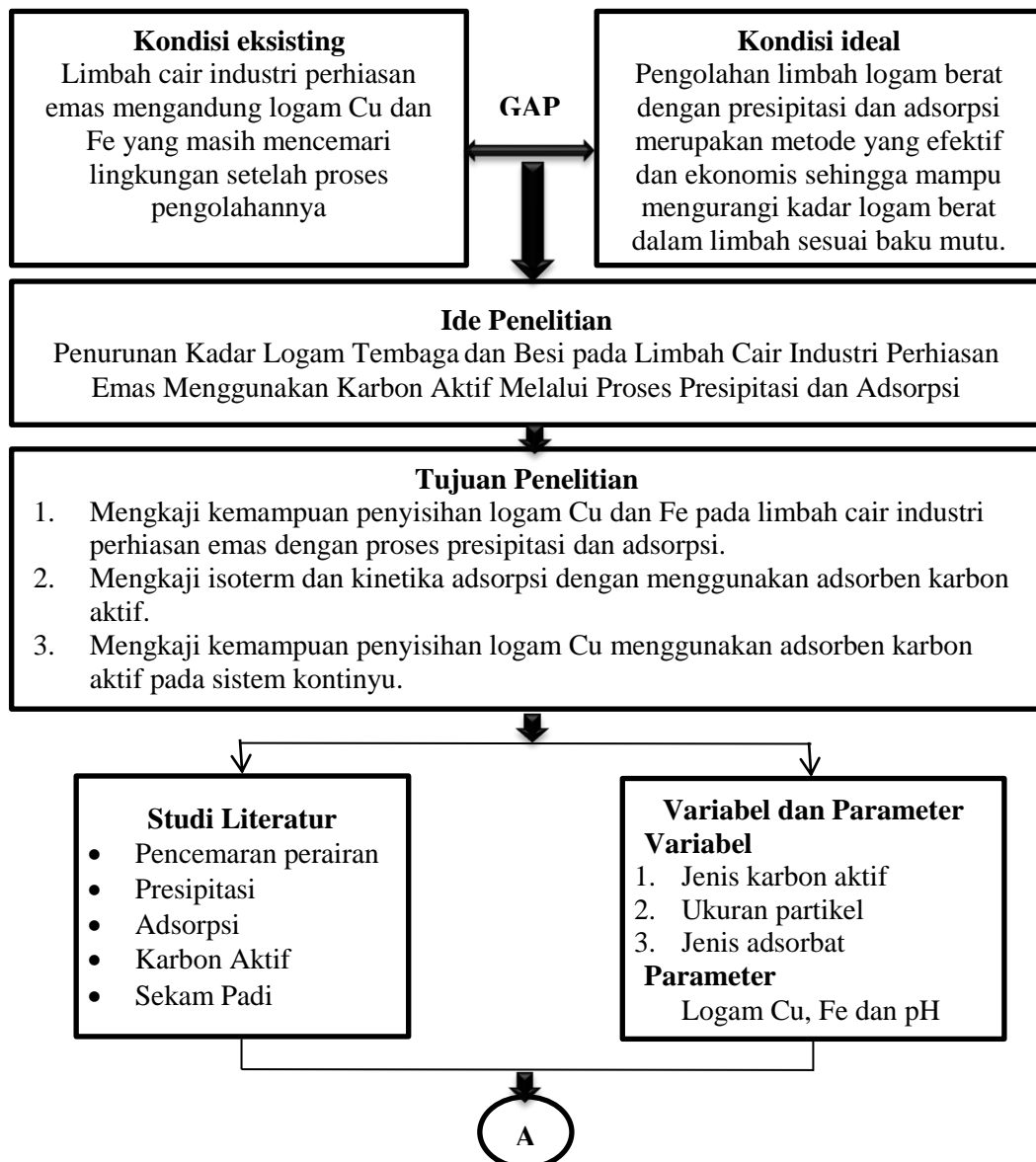
Ringkasan Penelitian	Hasil	Referensi												
pengolahan air, dibeli lalu diaplikasikan untuk menyisihkan logam Pb, Cd, Cu dan As, dengan variasi waktu.	Persentase penyisihannya : As 16% Pb 31,0% Cd 37% Cu 31%													
<ul style="list-style-type: none">Arang sekam diaktivasi dengan asam sulfat 13 MMenyisihkan Zn(II) dan Hg(II) dengan variasi massa adsorben, konsentrasi adsorbat, pH	Kondisi optimum diperoleh pada : Massa adsorben : 0,1 g Konsentrasi adsorbat : 50 mg/l pH : 6	El-Shafey (2014)												
<ul style="list-style-type: none">Adsorpsi Cr dan Zn pada limbah cair elektroplating dengan adsorben kulit pisangKonsentrasi influen adsorpsi kontinyu Cr 51,06 mg/l dan Zn 3,26 mg/l.	<table><tr><th>Debit (ml/menit)</th><th>t Breakthrough (menit)</th></tr><tr><td>60</td><td>510</td></tr><tr><td>75</td><td>1.000</td></tr><tr><td>90</td><td>1755</td></tr></table>	Debit (ml/menit)	t Breakthrough (menit)	60	510	75	1.000	90	1755	Fajrianti dkk. (2016)				
Debit (ml/menit)	t Breakthrough (menit)													
60	510													
75	1.000													
90	1755													
<ul style="list-style-type: none">Proses adsorpsi dengan tinggi unggun pada diameter 3 cm, ukuran adsorben serbuk gergaji 40 mesh, konsentrasi adsorbat 100 ppm dan laju alir 2 ml/menit.Variasi 10 cm, 15 cm dan 20 cm.	Daya serap logam Cu terbaik pada tinggi unggun 20 cm pada waktu kontak 20 menit dengan laju adsorpsi Cu 0,0028 ml/mg.menit.	Yelmida dkk. (2010)												
<ul style="list-style-type: none">Adsorpsi kontinyu dengan debit 222 ml/menit, ketinggian kolom 75 cm, ketinggian adsorben sekam padi 65 cm, ukuran partikel 10-30 mesh.Variasi konsentrasi influen 4 mg/l, 8 mg/l dan 12 mg/l.	<table><tr><th>Konsentrasi (mg/l)</th><th>Titik Jenuh (jam)</th><th>q (mg/g)</th></tr><tr><td>12</td><td>14,6</td><td>0,7734</td></tr><tr><td>8</td><td>18,3</td><td>1,185</td></tr><tr><td>4</td><td>20,5</td><td>1,3376</td></tr></table>	Konsentrasi (mg/l)	Titik Jenuh (jam)	q (mg/g)	12	14,6	0,7734	8	18,3	1,185	4	20,5	1,3376	Hadiwidodo, M. (2008)
Konsentrasi (mg/l)	Titik Jenuh (jam)	q (mg/g)												
12	14,6	0,7734												
8	18,3	1,185												
4	20,5	1,3376												

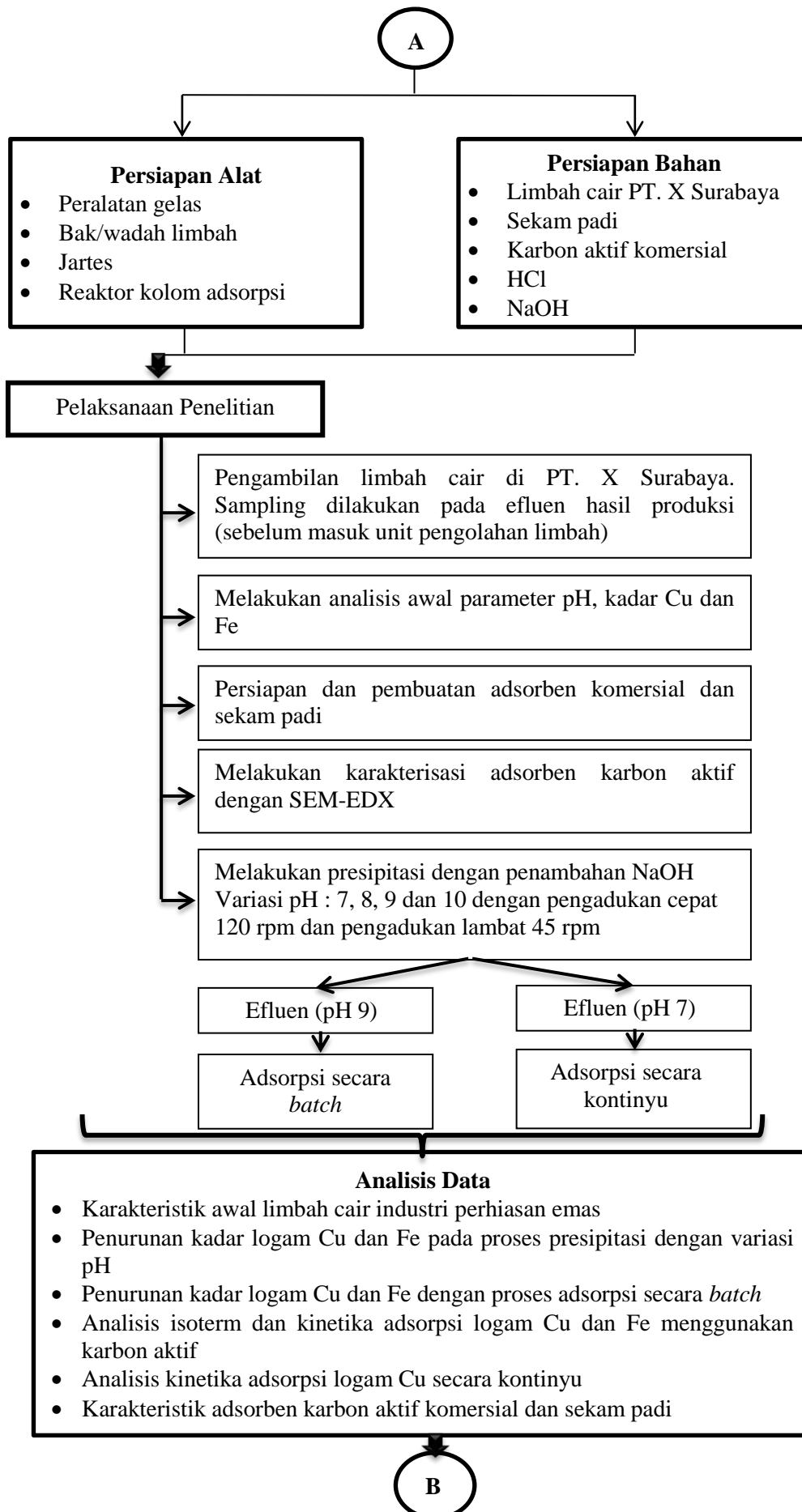
“Halaman ini sengaja dikosongkan”

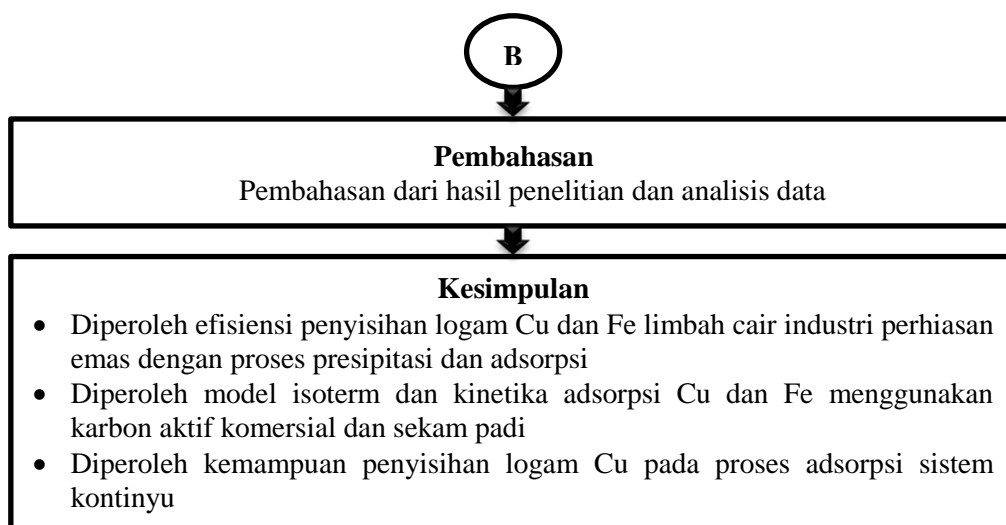
BAB 3

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode penelitian yang disajikan dalam bentuk kerangka penelitian. Kerangka penelitian disusun dengan tujuan memberikan gambaran umum penelitian yang akan dilakukan dan sebagai pedoman untuk memudahkan dalam melakukan penelitian. Kerangka penelitian diawali dengan perumusan ide penelitian sampai pada penarikan kesimpulan. Penelitian ini menguji potensi adsorben karbon aktif dalam penyisihan logam berat dalam limbah cair industri. Pelaksanaan penelitian ini sesuai bagan alir dalam Gambar 3.1.







Gambar 3.1 Kerangka penelitian.

3.1 Ide Penelitian

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan dalam Bab 1 maka dilakukan upaya pengolahan limbah cair industri sebelum dibuang ke badan air. Proses pengolahan yang dilakukan meliputi tahap presipitasi untuk mengurangi beban pencemar limbah dan tahap adsorpsi sebagai pengolahan lanjutan.

3.2 Tujuan dan Manfaat

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji kemampuan penyisihan logam berat Cu dan Fe dengan proses presipitasi dan adsorpsi, mengkaji model isoterm dan kinetika adsorpsi logam Cu dan Fe menggunakan adsorben karbon aktif serta mengkaji kemampuan penyisihan logam Cu pada proses adsorpsi secara kontinyu. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi pengolahan limbah cair industri yang menggunakan logam dalam proses produksinya dengan memanfaatkan karbon aktif.

3.3 Studi Literatur

Studi literatur dilakukan mulai dari tahap awal sampai penarikan kesimpulan dan penulisan jurnal. Studi literatur sangat dibutuhkan untuk membantu dan mendukung ide penelitian yang lebih mendalam terkait proses adsorpsi dalam pengolahan limbah cair. Literatur diperoleh dari bahan-bahan penunjang yaitu berupa jurnal, thesis, skripsi, *text book*, *proceeding* seminar,

peraturan pemerintah serta website. Literatur yang dibutuhkan dalam penelitian ini berkaitan dengan karakteristik limbah cair industri, pengolahan limbah cair dengan presipitasi dan adsorpsi, material dan reaktor adsorpsi serta faktor-faktor yang mempengaruhi proses presipitasi dan adsorpsi.

3.4 Variabel dan Parameter

Variabel dalam penelitian ini yaitu:

1. Jenis karbon aktif

Karbon aktif sebagai adsorben yang digunakan adalah karbon aktif komersial dan sekam padi. Karbon aktif sekam padi diaktivasi secara fisik-kimia.

2. Ukuran partikel

Variasi ukuran partikel adsorben karbon aktif yang digunakan yaitu 10-20 mesh dan 40-50 mesh.

3. Jenis adsorbat

Jenis adsorbat yang akan diserap adalah logam Cu dan Fe dalam sampel limbah cair industri perhiasan emas.

Parameter yang akan diuji adalah: kadar logam Cu, Fe dan pH

3.5 Persiapan Penelitian

Persiapan penelitian dilakukan mulai Februari 2018. Persiapan yang dilakukan meliputi perizinan, pengambilan sampel limbah cair industri, penyiapan bahan adsorben dan penyiapan reaktor adsorpsi. Penyiapan bahan dan alat dilakukan terlebih dahulu sebelum penelitian dimulai. Persiapan adsorben sekam padi dan karbon aktif komersial untuk proses adsorpsi dilakukan di Laboratorium Teknologi Pengolahan Air Teknik Lingkungan ITS.

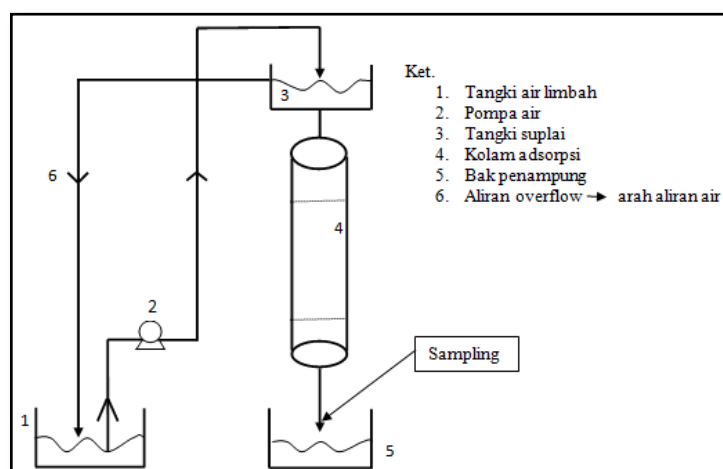
3.5.1 Perizinan

Perizinan yang dilakukan adalah kepada Badan Kesatuan Bangsa dan Politik Kota Surabaya, Dinas Lingkungan Hidup Kota Surabaya, Direktorat Industri PT. X Surabaya terkait permintaan pengambilan sampel.

3.5.2 Persiapan Reaktor

Proses adsorpsi logam secara kontinu dilakukan dalam *fixed-bed column*. Model aliran yang digunakan adalah aliran dari atas ke bawah. Pada model ini, limbah teradsorpsi secara cepat dan efektif. Lapisan atas adsorben merupakan lapisan tempat terjadinya kontak langsung antara permukaan adsorben dengan larutan berkonsentrasi tinggi (C_0), sementara lapisan adsorben dibawahnya akan menyerap larutan dengan konsentrasi lebih rendah, dan seterusnya. Namun seiring dengan berjalannya waktu, adsorben mencapai kondisi jenuh, yaitu kondisi dimana adsorben sudah tidak dapat mengadsorpsi kontaminan terlarut atau dengan kata lain berkurangnya efisiensi penyerapannya sehingga konsentrasi keluar (C_t) pada efluen mendekati konsentrasi larutan masuk (influen). Kolom media adsorpsi dibuat dari akrilik untuk mengamati proses adsorpsi menggunakan ukuran media adsorben granular. Rangkaian alat adsorpsi kontinu disajikan pada Gambar 3.2.

Pada penelitian ini digunakan kolom adsorpsi dengan diameter 4,5 cm dan tinggi 22 cm serta debit aliran 20 ml/menit. Adsorben karbon aktif dimasukkan kedalam kolom, selanjutnya sampel hasil proses presipitasi dengan konsentrasi yang telah diketahui dialirkan secara *down flow*. Pada bagian sebelum dan sesudah karbon aktif diberi pecahan kaca untuk menghomogenkan aliran limbah. Proses adsorpsi dilakukan selama 1.440 menit (24 jam) atau sampai terjadi *breakthrough* dan larutan efluen diambil setiap 60 menit untuk dianalisis kandungan logam Cu menggunakan AAS.



Gambar 3.2 Reaktor kolom adsorpsi kontinu.

3.5.3 Persiapan Sampel dan Material Adsorben

Sampel yang digunakan dalam penelitian ini adalah sampel limbah cair industri yang belum diolah. Material yang dibutuhkan dalam pembuatan adsorben berupa limbah sekam padi diperoleh dari tempat penimbunan sakam padi sedangkan karbon aktif komersial yang digunakan tersedia di pasaran.

3.6 Pelaksanaan Penelitian

Penelitian ini dilakukan selama 3 bulan, yaitu dari bulan April-Juni 2018. Penelitian dilakukan di Laboratorium Teknologi Pengolahan Air Teknik Lingkungan ITS untuk menyiapkan bahan dan alat penelitian serta proses presipitasi dan proses adsorpsi. Karakterisasi permukaan adsorben sebelum dan sesudah adsorpsi dilakukan dengan metode SEM-EDX *merk Carl Zeiss (EVO MA 10)* di Laboratorium Energi LPPM ITS dan untuk analisis masing-masing kandungan logam dengan metode AAS *merk Hitachi Type Z 2000* juga dilakukan di Laboratorium Energi LPPM ITS. Sementara pengukuran pH menggunakan pH-meter.

3.6.1 Pengambilan Limbah Cair di TP.X Surabaya

Pengambilan limbah cair industri dilakukan secara bertahap menggunakan jerigen kemudian ditampung dalam wadah tertutup sampai volume yang dibutuhkan tercapai, yaitu ± 100 L.

3.6.2 Analisis Karakteristik Awal Limbah Cair Industri

Sampel limbah cair industri mengandung bahan kimia berbahaya dan sangat toksik sehingga tidak dapat dibuang langsung ke badan air tanpa pengolahan terlebih dahulu. Karakterisasi awal limbah dilakukan dengan *Atomic Absorption Spectrophotometer* (AAS) untuk mengetahui kandungan logam dalam limbah tersebut (Alexander dkk., 2017). Analisis pH dilakukan dengan pHmeter (Metode Elektrometri/SNI 06-6989.11-2004).

3.6.3 Persiapan dan Pembuatan Adsorben Karbon Aktif

Variasi adsorben yang digunakan dalam penelitian ini adalah karbon aktif komersial yang dibeli dan sekam padi yang diaktivasi sendiri. Karbon aktif komersial dapat langsung digunakan setelah dilakukan pengayakan berdasarkan variasi ukuran partikel media.

a) Pembuatan Adsorben Sekam Padi

Arang sekam padi dapat digunakan sebagai adsorben karena mempunyai kandungan silika dan karbon yang tinggi. Aktivasi sekam padi bertujuan untuk memodifikasi bagian permukaan adsorben secara fisik-kimia sehingga dapat meningkatkan kapasitas adsorpsi. Pada penelitian ini menggunakan metode aktivasi fisik-kimia. Metode ini berfungsi mendegradasi molekul organik, selama proses karbonisasi, membatasi pembentukan tar, membantu dekomposisi senyawa organik serta dehidrasi air yang terjebak dalam rongga-rongga karbon (Alfiany, 2013).

Pembuatan adsorben sekam padi dimulai dengan pencucian untuk menghilangkan kotoran yang masih menempel kemudian dikeringkan dalam oven selama 3 jam pada suhu 110°C untuk mengurangi kadar air (Hsu, 2009). Setelah kering, sekam padi lalu dibakar dalam *furnace* selama 2 jam dengan suhu 400°C sampai menjadi arang (Darmayanti dkk., 2012; Wardalia 2016). Pada proses pembakaran ini dijaga agar tidak ada udara yang masuk sehingga sekam padi tidak terbakar menjadi abu. Proses selanjutnya yaitu aktivasi dengan perendaman HCl 5% (v/v) pada rasio karbon terhadap asam 1:10 (b/v) selama 24 jam (Hanum dkk., 2017). Perendaman dalam asam HCl ini bertujuan untuk menghilangkan pengotor-pengotor yang terdapat dalam arang sekam padi serta meningkatkan luas permukaan. Dalam penelitian Alfiany dkk. (2013) memvariasikan tiga jenis asam kuat yaitu H₂SO₄, HNO₃ dan HCl diperoleh HCl sebagai aktivator terbaik. Adsorben hasil aktivasi kemudian dicuci dengan aquades hingga pH 7.

b) Pengayakan Adsorben

Adsorben sekam padi dan adsorben komersial diayak untuk memperoleh ukuran sesuai variasi ukuran media yang digunakan. Variasi ukuran medianya yaitu 2,0-0,841 mm (10-20 mesh) dan 0,4-0,297 mm (40-50 mesh). Ukuran 2,0-0,841 mm diperoleh dari arang yang lolos ayakan 10 mesh dan tertahan pada

ayakan 20 mesh. Ukuran 0,4-0,297 mm diperoleh dari arang yang lolos ayakan 40 mesh dan tertahan pada ayakan 50 mesh.

3.6.4 Karakterisasi Adsorben dengan SEM-EDX

Sebelum digunakan dalam proses adsorpsi, karbon aktif komersial dan sekam dikarakterisasi terlebih dahulu. Karakterisasi dilakukan dengan metode *Scanning Electron Microscopy-Energy Dispersive X-ray* (SEM-EDX) di Laboratorium Energi dan Lingkungan LPPM-ITS. Karakterisasi adsorben bertujuan untuk mengetahui kandungan dalam material adsorben dan gambaran permukaan butiran serta distribusi pori adsorben berdasarkan ukuran partikel dan jenis adsorben. Karakterisasi adsorben juga dilakukan setelah proses adsorpsi pada kondisi optimum yang diperoleh. Hal ini bertujuan untuk mengetahui kandungan adsorben dan gambaran permukaan adsorben yang telah menyerap logam.

3.6.5 Proses Presipitasi

Proses presipitasi dilakukan dengan menambahkan NaOH sebagai *precipitating agent* untuk mengendapkan kation logam berat. NaOH sebagai *precipitating agent* hidroksida mudah didapatkan di pasaran dan mudah untuk digunakan serta disimpan. Dalam proses ini diharapkan terbentuk padatan logam hidroksida yang banyak sehingga dapat dipisahkan secara fisik. Proses presipitasi dilakukan dengan pengaturan pH yang bertujuan untuk menaikkan pH. Variasi pH yang digunakan yaitu 7, 8, 9 dan 10 (sesuai pH kelarutan minimum logam). Larutan NaOH 50% dibuat dengan melarutkan 500 g padatan NaOH ke dalam satu liter (1000 ml) aquades. Sebanyak 50 ml sampel limbah dimasukkan dalam masing-masing tiga beker gelas ukuran 250 ml. Kemudian ditambahkan NaOH sedikit demi sedikit untuk menaikkan pH-nya masing-masing yaitu pH 7, 8, 9 dan 10. Selama netralisasi dilakukan pengadukan agar campuran homogen (Jamhari, 2009).

Proses presipitasi dilakukan dengan pengadukan cepat yaitu 120 rpm selama satu menit, lalu dilanjutkan dengan pengadukan lambat 45 rpm selama 20 menit (Nugroho dkk., 2016). Setelah pengadukan lambat selesai, sampel limbah

diendapkan selama 5 jam agar diperoleh hasil pengendapan terbaik. Filtrat yang dihasilkan diukur kadar logam dengan metode AAS (Nugroho dkk., 2016 ; Jamhari, 2006) untuk mengetahui kadar beban pencemar yang akan diolah pada tahap selanjutnya yaitu proses adsorpsi. Pengolahan limbah hasil presipitasi dilanjutkan dengan proses adsorpsi dengan menggunakan pH optimum.

3.6.6 Proses Adsorpsi secara *Batch*

1. Percobaan Isoterm Adsorpsi

Percobaan isoterm adsorpsi dilakukan secara *batch* dengan variasi jenis adsorben. Massa adsorben yang ditambahkan yaitu 0,5 g, 1,0 g, 1,5 g, 2,0 g (Alexander dkk., 2017). Percobaan dilakukan dengan memasukan 100 ml sampel (pH optimum) hasil proses presipitasi kedalam Erlenmeyer lalu ditambah adsorben sesuai variasi yang ditentukan. Selanjutnya campuran sampel dan adsorben diaduk dengan kecepatan 150 rpm (Alexander dkk., 2017) selama 3 jam kemudian sampel disaring dengan kertas saring. Sampel yang telah disaring dianalisis konsentrasi masing-masing logam dengan AAS sesuai metode *American Public Health Association* (APHA).

2. Percobaan Kinetika Adsorpsi

Percobaan kinetika adsorpsi dilakukan secara *batch*. Variasi waktu kontak yang digunakan yaitu 0,5 jam, 1 jam, 2 jam dan 4 jam. Percobaan dilakukan dengan memasukan 100 ml sampel (pH optimum) hasil proses presipitasi ke dalam Erlenmeyer lalu ditambah adsorben sesuai dosis optimum yang diperoleh pada percobaan isoterm adsorpsi yaitu 2 gram. Selanjutnya campuran sampel dan adsorben diaduk dengan kecepatan 150 rpm (Alexander dkk., 2017) dengan variasi waktu yang telah ditentukan. Sampel disaring dengan kertas saring untuk kemudian dianalisis konsentrasi masing-masing logam dengan AAS sesuai metode *American Public Health Association* (APHA).

3. Percobaan Adsorpsi secara Kontinu

Pengolahan sampel limbah cair hasil tahap presipitasi pada sistem kontinu menggunakan dosis serta waktu kontak optimum yang diperoleh pada sistem *batch*. Pada penelitian ini digunakan proses adsorpsi logam secara kontinu dalam *fixed-bed column* dengan dosis adsorben yang digunakan sebanyak

17,59 gram. Model aliran yang digunakan adalah aliran dari atas ke bawah. Debit aliran yang digunakan adalah 20 ml/menit. Proses adsorpsi kontinyu dilakukan selama 1.440 menit (24 jam) dan larutan efluen diambil setiap 60 menit untuk dianalisis kandungan logamnya menggunakan AAS.

3.7 Analisis Data

3.7.1 Analisis Karakteristik Adsorben Karbon Aktif

Karakteristik karbon aktif sekam padi dan komersial dianalisis berdasarkan data hasil SEM-EDX dengan membandingkan karakteristik adsorben sebelum dan setelah digunakan sebagai adsorben limbah.

3.7.2 Analisis Karakteristik Limbah Cair Industri

Karakteristik limbah cair sebelum dan setelah proses pengolahan dengan metode presipitasi dan adsorpsi dianalisis berdasarkan data konsentrasi logam hasil pengukuran dengan AAS sesuai metode *American Public Health Association* (APHA).

3.7.3 Analisis Model Isoterm dan Kinetika Adsorpsi

Analisis isoterm adsorpsi dilakukan dengan memodelkan data yang telah dihasilkan. Konsep Freundlich dan Langmuir digunakan dalam analisis isoterm adsorpsi untuk mendapatkan model Freundlich dan Langmuir serta koefisiennya. Rumus Freundlich dan Langmuir yang digunakan seperti pada persamaan (10) (11) (12) dan (13).

Analisis kinetika adsorpsi dilakukan dengan mengevaluasi kecepatan adsorben sekam padi dan karbon aktif komersial dalam mengadsorpsi logam dalam larutan. Analisis yang digunakan yaitu analisis kinetika orde pertama semu dan kinetika orde kedua semu seperti pada persamaan (14) dan (15).

3.7.4 Analisis Kapasitas Adsorpsi Logam Secara Kontinyu

Analisis kapasitas adsorpsi logam secara kontinyu dilakukan dengan menggunakan model Thomas dan Bohart-Adams. Persamaan yang digunakan yaitu persamaan (16) dan (17).

3.8 Pembahasan

Pembahasan dilakukan berdasarkan hasil analisis data yang telah diperoleh dan mengacu pada studi literatur yang telah dilakukan. Hasil penelitian terdahulu juga digunakan sebagai pembandingan dalam penelitian ini. Analisis dan pembahasan yang dilakukan adalah:

1. Membandingkan karakteristik limbah sebelum dan setelah dilakukan pengolahan dengan proses presipitasi. Analisis ini bertujuan untuk menjawab tujuan pertama dalam penelitian ini.
2. Menganalisis konsentrasi logam pada proses isoterm dan kinetika adsorpsi dengan menggunakan data AAS serta membandingkannya dengan variasi ukuran partikel adsorben, jenis adsorben serta dosis adsorben. Hasil yang paling optimum (terbaik) adalah variasi yang menghasilkan kapasitas penyerapan logam terbaik. Analisis ini bertujuan untuk melanjutkan proses adsorpsi secara kontinyu serta untuk menjawab tujuan ketiga dalam penelitian ini.
3. Menganalisis kemampuan penyisihan logam pada sistem kontinyu. Berdasarkan hasil pengolahan dengan adsorpsi secara kontinyu akan diketahui volume limbah yang dapat diolah dengan menggunakan adsorben karbon aktif serta kondisi *breakthrough*.

3.9 Kesimpulan dan Saran

Penarikan kesimpulan akhir dilakukan setelah analisis data dan pembahasan. Kesimpulan yang diambil berdasarkan pada hasil penelitian dan tujuan yang dirumuskan pada awal penelitian. Penarikan kesimpulan dilakukan berdasarkan fakta yang diperoleh dari penelitian. Pemberian saran dilakukan dengan tujuan perbaikan dan pengembangan penelitian selanjutnya terkait pengolahan limbah cair industri dengan metode presipitasi dan adsorpsi.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini dilakukan dalam skala laboratorium untuk mengetahui efisiensi penyisihan logam Cu dan Fe. Proses penyisihan logam Cu dan Fe pada limbah cair industri perhiasan emas dilakukan dengan cara presipitasi serta adsorpsi. Proses presipitasi merupakan tahapan pengolahan awal yang bertujuan untuk mengurangi kadar logam berat sebelum proses adsorpsi. Sistem yang digunakan pada proses adsorpsi yaitu *batch* dan kontinyu. Proses adsorpsi dilakukan menggunakan adsorben berupa karbon aktif komersial yang tersedia di pasaran dan sekam padi yang dibuat dengan aktivasi asam. Parameter pencemar pada penelitian ini adalah logam Cu dan Fe karena kedua logam tersebut merupakan logam yang dihasilkan dari proses produksi dengan konsentrasi yang besar. Parameter tersebut dipilih karena merupakan logam berat yang dapat terakumulasi pada rantai makanan walaupun pada konsentrasi yang sangat rendah.

4.1 Karakteristik Awal Limbah Cair Industri PT. X Surabaya

Karakteristik awal limbah cair diperoleh dari penelitian pendahuluan. Dengan mengetahui karakteristik awal limbah pada kondisi eksisting maka akan mempermudah pemilihan proses yang digunakan serta mempermudah perhitungan persentase penyisihan pencemar (logam Cu dan Fe). Penelitian awal dilakukan analisis kadar logam Cu di Laboratorium Energi dan Lingkungan (LPPM-ITS) dan Fe di Laboratorium Manajemen Kualitas Lingkungan-ITS. Berdasarkan hasil dari penelitian awal diperoleh kadar logam Cu dan Fe yang disajikan pada Tabel 4.1.

Tabel 4. 1 Karakteristik Limbah Awal Sebelum Proses Pengolahan

Parameter Uji	Satuan	Hasil Uji	Persyaratan Mutu (*)
Cu	mg/l	3.227	2
Fe	mg/l	1.837,50	10
pH	-	0,6-0,7	6-9

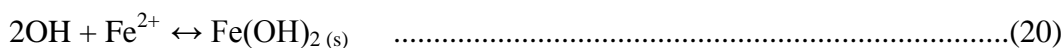
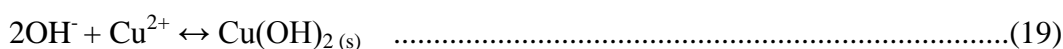
*Baku Mutu berdasarkan Pergub Jatim. No 52 Tahun 2014 (Hasil Analisis).

Baku mutu yang digunakan untuk air limbah industri dalam penelitian ini mengacu pada baku mutu air limbah untuk industri dan/atau kegiatan usaha lainnya dalam Peraturan Gubernur Jawa Timur Nomor 52 Tahun 2014: Industri Peleburan dan Pengolahan Emas dan Tembaga. Berdasarkan hasil pengukuran, diketahui bahwa konsentrasi logam berat Cu dan Fe berada diatas ambang batas kualitas buangan air limbah. Sampel limbah ini memiliki pH sangat rendah yaitu 0,6-0,7 yang disebabkan oleh penggunaan asam dalam proses produksi perhiasan emas. Kondisi ini menyebabkan logam berat terlarut sehingga konsentrasinya akan tetap karena sifat kelarutan logam pada pH asam.

Dari karakteristik tersebut dapat dikatakan bahwa limbah cair perhiasan emas termasuk air limbah yang memiliki potensi mencemari lingkungan serta organisme. Selain mengandung Cu dan Fe yang tinggi, limbah cair ini juga dapat mengkorosi logam sehingga penanganannya sulit serta menimbulkan pencemaran udara akibat bau asam pekat yang dikeluarkan (Rajagukguk, 2017).

4.2 Proses Presipitasi

Proses presipitasi sampel limbah dilakukan untuk mengurangi kadar logam dengan cara memisahkan kation logam dari limbah cair. Penelitian ini menggunakan natrium hidroksida (NaOH) sehingga disebut presipitasi hidroksida. Proses pengolahan limbah cair industri perhiasan emas menggunakan NaOH prinsipnya berdasarkan pada reaksi pengendapan kation logam. NaOH digunakan sebagai agen presipitat karena sifatnya yang akan mengion di dalam air menjadi ion hidroksida. Ion tersebut yang akan bereaksi dengan kation logam dalam larutan sampel menjadi padatan hidroksida logam yang tidak larut dalam air. Endapan logam hidroksida yang terbentuk dapat dipisahkan secara fisik. Penambahan NaOH pada sampel limbah sebanding dengan meningkatnya pH air limbah menjadi basa karena adanya sejumlah ion OH⁻. Pembentukan endapan logam hidroksida mengikuti reaksi berikut.



Pada penelitian ini, penentuan massa optimum NaOH yang digunakan dalam pengaturan pH untuk mengurangi kadar logam Cu dan Fe dilakukan dengan metode Jar tes. Variasi pH yang digunakan yaitu 7, 8, 9 dan 10 (Tabel 4.2). Penambahan NaOH dilakukan secara bertahap sambil diukur nilai pH menggunakan pHmeter. Nilai pH digunakan untuk menggambarkan sifat keasaman limbah cair dengan adanya konsentrasi ion H^+ dalam limbah: $pH = -\log [H^+]$. Berdasarkan uji karakteristik awal limbah cair perhiasan emas diketahui bahwa limbah bersifat asam dengan pH kurang dari 1. Limbah ini akan merusak lingkungan (bersifat korosif) serta biota perairan. Oleh sebab itu limbah dinetralkan sebelum dibuang ke lingkungan, dimana baku mutu buangan cair untuk parameter pH adalah 6,5-9,0 (Kepmen LH No. 51/2004)

NaOH sebagai agen presipitasi ditambahkan dalam sampel limbah cair industri untuk mengendapkan kation logam terlarut. Proses fisik yang terjadi yaitu perubahan bentuk padatan terlarut yang relatif berukuran kecil menjadi padatan tersuspensi yang berukuran relatif besar sehingga dapat diendapkan. Selain itu faktor pengadukan juga berperan penting untuk mempercepat proses presipitasi dan menyeragamkan pendistribusian bahan kimia dalam larutan. Dalam penelitian ini, adanya penambahan NaOH dan pengadukan cepat 120 rpm menghasilkan destabilisasi partikel koloid dan pembentukan inti flok. Selanjutnya diikuti proses penggumpalan atau penggabungan inti flok hasil destabilisasi dengan adanya pengadukan lambat 45 rpm. Proses presipitasi menghasilkan endapan logam hidroksida dan supernatan.



Gambar 4.1 Perubahan pada proses presipitasi.

Gambar 4.1 terlihat adanya perubahan warna larutan hijau menjadi cokelat dan munculnya endapan cokelat pada dasar gelas *beaker* setelah didiamkan beberapa saat. Hal ini menunjukkan berlangsungnya proses pengendapan partikel logam hidroksida. Selama satu hari didiamkan akan terbentuk dua lapisan yaitu endapan lumpur dan filtrat yang dapat dipisahkan dengan dekantasi dan penyaringan.

Filtrat hasil penyaringan ini diukur kadar logam Cu dan Fe. Data hasil uji pengujian kadar logam terkait pengaruh pH terhadap penyisihan logam dapat dilihat pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Pengaruh pH Terhadap Penyisihan Logam Cu dan Fe

pH	Influen (mg/l)		Efluen (mg/l)		Baku Mutu (mg/l)		Efisiensi Penyisihan (%)	
	Cu	Fe	Cu	Fe	Cu	Fe	Cu	Fe
7	3227	1837,5	4,5	0,09	2	10	99,86	99,99
8	3227	1837,5	3,2	0,06	2	10	99,90	99,99
9	3227	1837,5	1,9	0,02	2	10	99,94	99,99
10	3227	1837,5	2,1	0,07	2	10	99,93	99,99

(Hasil Analisis).

Berdasarkan Tabel 4.2 diketahui bahwa proses presipitasi pada pH 9 merupakan pengendapan optimum dan dapat menurunkan kadar logam Cu dan Fe mencapai 99% dengan efluen yang memenuhi baku mutu. Pada pH kurang dari atau lebih dari 9 kadar logam dalam larutan semakin meningkat. Hal ini sesuai dengan kurva kelarutan logam, dimana pada pH 9 merupakan titik kelarutan minimum bagi logam Cu maupun Fe. Pada pH 10, kadar logam dalam larutan kembali meningkat. Hal ini disebabkan oleh penambahan OH^- yang berlebih sehingga memiliki potensi membentuk kompleks dengan endapan logam hidroksida yang terbentuk dan akan melarutkan kembali logam yang telah mengendap (Fajrianti dkk., 2016). Penelitian Soemantojo dkk., (2010) juga menunjukkan pengendapan Cu sebesar 99,94% pada pH 8,5 dan Fe sebesar 99,97% pada pH 7. Kelarutan berbagai jenis logam sangat ditentukan oleh pH larutan. Apabila pH air rendah akan terjadi proses korosif sehingga menyebabkan larutnya besi dan logam lain dalam air. Menurut Begum dkk., (2009), pH <7 dapat melarutkan logam. Pada pH larutan yang rendah besi berada dalam bentuk ferro (Fe^{2+}) dan ferri (Fe^{3+}), dimana bentuk ferri akan mengendap dan tidak larut dalam

air serta tidak dapat dilihat secara kasat mata sehingga air menjadi berwarna, berbau dan berasa (Supriyantini dan Hadi, 2015). Karakteristik ini digunakan sebagai acuan pada penyisihan logam terlarut dalam limbah cair.

Proses presipitasi sempurna terjadi pada pH 9 tetapi memerlukan banyak larutan NaOH dalam pembentukan padatan logam hidroksida. Proses presipitasi pada pH 7 (pH netral) mampu menurunkan kadar logam Cu dan Fe secara signifikan yaitu masing-masing sebesar 99,86% dan 99,99%. Persentase penyisihan logam Cu dan Fe dapat dilihat pada Tabel 4.2. Hasil presipitasi limbah pada pH 7 ini aman untuk dibuang ke badan air tetapi kadar logam Cu masih cukup tinggi atau masih diatas baku mutu. Konsentrasi efluen logam Cu sebesar 4,5 mg/l, dimana baku mutu Cu sebesar 2 mg/l (Pergub Jatim, No 52 Tahun 2014). Oleh sebab itu maka diperlukan *treatment* lanjutan dengan proses adsorpsi untuk mengurangi kadar logam Cu.

Proses presipitasi merupakan tahap awal dalam proses pengolahan limbah cair industri perhiasan emas pada penelitian ini. Presipitasi pada pH 9 menghasilkan efluen dengan konsentrasi logam Cu sebesar 1,9 mg/l dan konsentrasi Fe sebesar 0,02 mg/l. Limbah hasil prsipitasi pada pH 9 ini lanjutkan dengan pengolahan adsorpsi secara *batch* skala laboratorium. Dari percobaan tersebut diperoleh model isoterm dan kinetika proses adsorpsi logam Cu dan Fe. Sementara proses adsorpsi secara kontinyu dilakukan menggunakan limbah hasil presipitasi pada pH 7 dengan efluen konsentrasi logam Cu sebesar 4,5 mg/l dan konsentrasi Fe sebesar 0,09 mg/l.

4.3 Proses Adsorpsi

Proses adsorpsi terhadap sampel hasil presipitasi pada pH 9 sebelumnya dilakukan dengan menggunakan dua jenis karbon aktif yaitu karbon aktif komersial dan karbon aktif sekam padi yang diaktivasi secara fisik-kimia. Karbon aktif komersial diperoleh dari toko kimia yang telah banyak digunakan secara umum oleh masyarakat. Karbon aktif sekam padi diaktivasi sendiri secara fisik-kimia dengan perendaman larutan HCl 50% selama 24 jam (Hanum dkk., 2017). Kedua jenis karbon aktif tersebut divariasikan ukuran partikelnya menjadi 10-20 mesh dan 40-50 mesh. Proses adsorpsi secara *batch* dilakukan dengan menvariasikan dosis dan waktu kontak. Pada penelitian ini akan diketahui jenis

karbon aktif yang lebih efektif untuk digunakan dalam pengolahan limbah cair industri.

4.3.1 Pengaruh Dosis Adsorben

Filtrat hasil proses adsorpsi (variasi dosis) yang diperoleh dari penyaringan dianalisis AAS dan diketahui kadar logamnya seperti pada Tabel 4.3.

Tabel 4. 3 Konsentrasi Logam Setelah Proses Adsorpsi Berdasarkan Variasi Dosis Adsorben

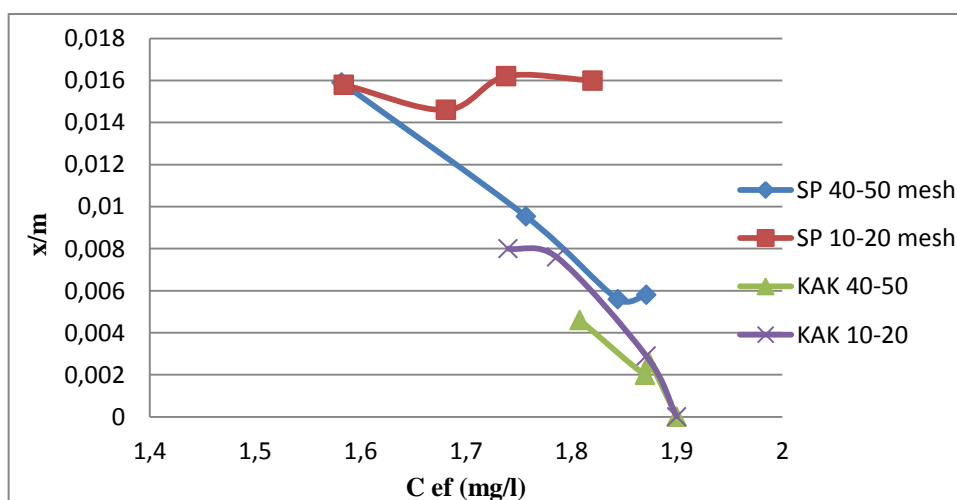
Jenis Adsorben	Jenis Logam	Ukuran Adsorben (mesh)	Massa Adsorben (g)			
			0,5	1,0	1,5	2,0
Konsentrasi Logam (mg/l)						
Karbon Aktif Komersial	Cu	10-20	1.90	1,871	1,786	1,740
		40-50	1,90	1,874	1,870	1,808
	Fe	10-20	0	0	0,006	0,004
		40-50	0,02	0,007	0,007	0,015
Karbon Aktif Sekam Padi	Cu	10-20	1,820	1,738	1,681	1,584
		40-50	1,871	1,844	1,757	1,582
	Fe	10-20	0	0	0	0
		40-50	0	0	0	0

(Hasil Analisis).

Pada Tabel 4.3 dapat diamati perubahan konsentrasi logam terhadap dosis karbon aktif yang ditambahkan. Adsorpsi logam oleh karbon aktif komersial 10-20 mesh menunjukkan penyerapan logam Cu terbesar pada dosis adsorben 2 g, sedangkan logam Fe dengan adsorben 0,5 g saja dapat menyerap seluruh logam Fe. Konsentrasi Fe kembali naik pada penambahan adsorben karbon aktif komersial ukuran 10-20 mesh dengan dosis 1,5 dan 2 g. Sementara karbon aktif komersial berukuran 40-50 mesh menunjukkan penyerapan Cu terbesar dengan penambahan dosis adsorben 2 g sedangkan logam Fe pada penambahan 1 g dan 1,5 g adsorben. Konsentrasi penyerapan logam Fe yang fluktuatif ini menunjukkan bahwa kemungkinan logam Fe tidak teradsorpsi pada adsorben akan tetapi terpresipitasi membentuk $\text{Fe}(\text{OH})_3$ akibat adanya interaksi antara Fe dan H_2O dalam larutan. Besi terlarut dapat berbentuk senyawa tersuspensi, sebagai butir koloida seperti $\text{Fe}(\text{OH})_3$, FeO , Fe_2O_3 dan lain-lain (Darmono, 2001).

Pada penggunaan karbon aktif sekam padi baik ukuran 10-20 mesh maupun 40-50 mesh, semakin banyak dosis adsorben yang ditambahkan semakin

besar penyerapan terhadap logam Cu. Logam Cu teradsorpsi sebagian pada adsorben sekam padi. Penyerapan Cu maksimum pada penambahan dosis adsorben 2 g. Sementara logam Fe tidak terdeteksi jumlahnya saat dilakukan uji kadar logam karena ion logam Fe dalam air akan cenderung terpresipitasi membentuk endapan logam hidroksida yang berukuran lebih besar sehingga sulit teradsorpsi. Kemampuan penyerapan ion logam dipengaruhi oleh ukuran ion logam berbeda-beda, distribusi alami adsorben yang aktif, interaksi antara ion logam dan adsorben (Rahman dkk., 2012). Besarnya penyerapan ion logam juga dipengaruhi oleh konsentrasi awal ion logam dalam larutan. Semakin besar konsentrasi, semakin banyak jumlah molekul dalam larutan, sehingga interaksi antara molekul adsorbat dan adsorben semakin meningkat. Interaksi yang semakin besar ini akan meningkatkan proses penyerapan sampai pada kapasitas maksimal suatu adsorben. Kapasitas penyerapan karbon aktif komersial dan sekam padi disajikan dalam Gambar 4.2 berikut.



Gambar 4.2 Grafik kapasitas penyerapan maksimum adsorben karbon aktif (Hasil Analisis).

Berdasarkan Gambar 4.2 dapat disimpulkan bahwa jenis karbon aktif yang memiliki kapasitas penyerapan terbesar (x/m terbesar) adalah karbon aktif sekam padi yang berukuran 10-20 mesh dan 40-50 mesh. Kapasitas penyerapan adsorben sekam padi 10-20 mesh sama dengan 40-50 mesh yaitu sebesar 0,0158 mg/g. Sementara karbon aktif komersial yang memiliki kapasitas penyerapan

terbesar adalah ukuran 10-20 mesh dengan nilai x/m sebesar 0,008 mg/g sedangkan ukuran 40-50 mesh memiliki nilai x/m sebesar 0,004 mg/g.

Salah satu penyebab rendahnya daya serap ini dikarenakan masih adanya senyawa-senyawa non-karbon seperti abu, air dan logam lainnya yang menempel pada permukaan karbon aktif sehingga menutupi pori-pori (Sathasivam dan Haris, 2010). Berdasarkan hasil analisis SEM-EDX diketahui bahwa dalam adsorben komersial maupun sekam padi sebelum digunakan dalam proses adsorpsi terdapat beberapa unsur seperti klor, kalium, magnesium dan natrium.

4.3.2 Pengaruh Waktu Kontak

Proses adsorpsi dengan memvariasikan waktu kontak dilakukan untuk memberikan kesempatan interaksi antara adsorbat dan adsorben. Adsorben yang ditambahkan pada tahap ini adalah 2 g, sesuai penyerapan maksimum terhadap ion logam Cu dan Fe menggunakan adsorben komersial dan sekam padi. Filtrat hasil proses adsorpsi (variasi waktu kontak) yang diperoleh dari penyaringan dianalisis AAS dan diketahui kadar logamnya seperti pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Konsentrasi Logam Setelah Proses Adsorpsi Berdasarkan Variasi Waktu Kontak

Jenis Adsorben	Jenis Logam	Ukuran Adsorben (mesh)	Waktu (jam)			
			1,5	1	2	4
			Konsentrasi Logam (mg/l)			
Karbon Aktif Komersial	Cu	10-20	1,062	0,813	0,484	0,395
		40-50	1,534	1,267	1,19	1,138
	Fe	10-20	0,004	0,004	0,008	0,006
		40-50	0,006	0,004	0,01	0,004
Karbon Aktif Sekam Padi	Cu	10-20	1,15	0,81	0,63	0,44
		40-50	0,92	0,72	0,45	0,32
	Fe	10-20	0,02	0,008	0,008	0,004
		40-50	0,011	0,006	0,004	0,004

(Hasil Analisis).

Tabel 4.4 menunjukkan bahwa penyisihan logam Cu dan Fe oleh karbon aktif meningkat dengan semakin lamanya waktu kontak. Dapat dilihat dari berkurangnya konsentrasi adsorbat dalam larutan. Hal ini menunjukkan bahwa semakin lama waktu kontak, kesempatan interaksi antara adsorbat dan adsorben semakin lama sehingga proses penyerapan semakin meningkat dan kadar logam

tersisa dalam larutan menjadi berkurang. Waktu kontak optimum dalam penyisihan logam Cu dan Fe adalah 4 jam (240 menit). Penelitian El-Moselhy dkk. (2017) penyisihan tertinggi logam Cu dan Cd dalam larutan dengan adsorben sekam padi juga terjadi pada waktu kontak yang paling lama yaitu 120 menit.

4.3.3 Isoterm Adsorpsi secara Batch

Isoterm adsorpsi merupakan hal penting karena dapat memberikan gambaran interaksi yang terjadi antara adsorben dan adsorbat. Isoterm adsorpsi ini menjelaskan hubungan antara jumlah zat yang teradsorpsi dengan jumlah adsorben pada waktu kesetimbangan. Dalam penelitian ini menggunakan model isoterm Freundlich dan Langmuir karena kedua model tersebut lebih sering digunakan dan juga lebih mempresentasikan proses adsorpsi logam berat. Perhitungan model isoterm adsorpsi Freundlich dan Langmuir yang memiliki pola isoterm paling sesuai akan dipilih sebagai model isoterminya untuk mengetahui jenis adsorpsi yang terjadi.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui persamaan isoterm adsorpsi Freundlich dan Langmuir pada proses penyerapan logam Cu dan Fe. Untuk mengetahui model isoterm yang menggambarkan proses adsorpsi suatu zat maka digunakan analisis model isoterm Freundlich dan Langmuir sesuai persamaan (10), (11), (12) dan (13).

Untuk menentukan persamaan isoterm Freundlich dan Langmuir maka dihitung nilai $\log C_{\text{efluen}}$, $\log q$, $1/C_{\text{efluen}}$ dan $1/q$ seperti yang disajikan dalam Lampiran 3. Dari data Lampiran 3 tersebut dilakukan pemetaan grafik menggunakan Excel dengan memplotkan nilai $\log C_{\text{efluen}}$ vs $\log q$ untuk mendapatkan persamaan Freundlich dan memplotkan nilai $1/C_{\text{efluen}}$ dan $1/q$ untuk mendapatkan persamaan Langmuir (Tabel 4.5). Berikut adalah Tabel 4.5 yang menunjukkan bervariasinya konstanta pada masing-masing variasi adsorben.

Tabel 4. 5 Hasil Analisis Isoterm Adsorpsi Cu^{2+} dan Fe^{2+} menggunakan KAK dan SP

Jenis Adsorben	Logam	Ukuran partikel (mesh)	Freundlich			Langmuir		
			N	KF	R^2	KL	qm	R^2
Karbon aktif komersial	Cu	10-20	0,0285	$1,5 \times 10^{-11}$	0,2929	-1,383	0,004	0,0008
		40-50	-0,1048	1,0134	0,9949	0,008	0,1845	0,6877
	Fe	10-20	4,4762	0,0028	0,8539	100,646	0,0025	0,9401
		40-50	0,2368	758402,9	0,3679	-298,68	0,0004	0,0445
Karbon aktif sekam Padi	Cu	10-20	4,2955	0,0138	0,0842	2,045	0,0201	0,075
		40-50	-0,1574	0,3035	0,9625	-0,678	0,0012	0,8957
	Fe	10-20	-	-	-	-	-	-
		40-50	-	-	-	-	-	-

(Hasil Analisis).

Pada data Tabel 4.5 menunjukkan konstanta masing-masing adsorben bervariasi ditinjau dari jenis adsorben dan ukuran partikel adsorben. Hasil analisis data menunjukkan bahwa kapasitas adsorpsi maksimum (qm) kedua jenis adsorben untuk mengadsorpsi Cu dan Fe ditinjau dari model Langmuir berkisar antara 0,0004-0,1845 mg/g. Nilai kapasitas adsorpsi logam Cu menggunakan adsorben sekam padi berukuran 10-20 mesh lebih tinggi dibandingkan dengan adsorben komersial ukuran 10-20 mesh dengan nilai berturut-turut sebesar 0,0201 mg/g dan 0,004 mg/g. Nilai tersebut menunjukkan adanya aktivasi dengan larutan HCl dapat meningkatkan kapasitas adsorpsi maksimum dari sekam padi. Dalam penelitian ini dilakukan percobaan adsorpsi dengan menggunakan sekam padi tanpa diaktivasi, diperoleh konsentrasi akhir (Ce) sebesar 2,08 mg/l dengan penambahan 1 g sekam padi dan (Ce) sebesar 1,89 mg/l dengan penambahan 2 g sekam padi. Hal ini menunjukkan bahwa proses aktivasi sekam padi dengan HCl dapat meningkatkan 1 kali kapasitas penyerapan. Sementara untuk ukuran partikel 40-50 mesh, kapasitas penyerapan maksimum adsorben komersial lebih besar dari adsorben sekam padi dengan nilai berturut-turut 0,184 mg/g dan 0,0012 mg/g.

Ditinjau dari ukuran media adsorben pada percobaan *batch* diketahui bahwa ukuran adsorben 10-20 mesh memiliki kemampuan penyisihan logam yang tidak berbeda signifikan dengan ukuran 40-50 mesh. Oleh sebab itu maka proses adsorpsi secara kontinyu akan dilakukan menggunakan adsorben berukuran 10-20 mesh dengan menggunakan adsorben yang memiliki nilai x/m terbesar. Penggunaan ukuran partikel 10-20 mesh ini berdasarkan pertimbangan dalam

proses kontinyu dimana aliran air limbah yang masuk tidak akan membawa partikel adsorben bersamaan dengan efluen limbah..

Adsorpsi logam Cu menggunakan adsorben komersial dan sekam padi berdasarkan variasi ukuran partikel lebih sesuai dengan model isoterm Freundlich jika ditinjau dari nilai koefisien determinasi. Pola adsorpsi ditentukan dengan cara membandingkan tingkat kelinieran kurva yang ditunjukkan oleh nilai R^2 . Nilai R^2 yang dapat diterima adalah $\geq 0,95$ atau 95% (Kurniaty, 2008). Jadi proses adsorpsi logam Cu dengan adsorben sekam padi ukuran 40-50 mesh cenderung mengikuti model isoterm Freundlich dengan nilai R^2 0,9625. Hal ini menjelaskan bahwa proses adsorpsi Cu dengan sekam padi bersifat multilayer. Proses adsorpsi logam Cu dengan adsorben komersial juga cenderung mengikuti model isoterm Freundlich yang menunjukkan pembentukan lapisan multilayer.

Penyerapan logam Fe dengan adsorben komersial menunjukkan nilai yang fluktuatif. Sedangkan dengan menggunakan adsorben sekam padi tidak terjadi penyerapan pada adsorben. Hal ini disebabkan oleh konsentrasi Fe hasil presipitasi (influen proses adsorpsi) yang sangat kecil yaitu 0,09 mg/l dengan efisiensi penyisihan Fe sebesar 99,9%. Kapasitas penyerapan logam Fe dengan menggunakan sekam padi tidak dapat digambarkan dengan model isoterm adsorpsi karena logam Fe dalam larutan tidak terdeteksi saat uji logam. Hal ini dapat dipastikan bahwa logam Fe mengalami presipitasi akibat adanya interaksi dengan H_2O dalam larutan sampel. Menurut Andreas dkk., (2006), dalam medium air, ion logam khususnya untuk kation logam transisi dengan elektronegativitas yang relatif tinggi cenderung membentuk kation terhidrat dengan H_2O , kation-kation tersebut membentuk ikatan kovalen (koordinasi) dengan H_2O dalam bentuk ion kompleks yang larut dalam air. Kompleks molekul H_2O yang terbentuk itu memiliki ukuran yang cukup besar sehingga memiliki kemampuan yang sangat kecil untuk dapat teradsorpsi pada permukaan adsorben. Banerjee dkk, (2016) juga mengatakan bahwa pada pH tinggi terjadi pengendapan Fe^{2+} menjadi $Fe(OH)_3$ sehingga penyerapan Fe^{2+} menjadi menurun.

4.3.4 Kinetika Adsorpsi secara Batch

Kinetika adsorpsi merupakan kajian yang digunakan untuk mengidentifikasi bagaimana mekanisme yang terjadi pada suatu adsorben. Persamaan yang digunakan untuk menentukan model kinetika orde satu semu dan orde dua semu yaitu persamaan (14) dan (15).

Untuk menentukan persamaan kinetika orde satu semu dan orde dua semu maka dihitung nilai $\log q_e - q_t$ dan t/q_t seperti pada Lampiran 4. Dari data Lampiran 4 tersebut dibuat pemetaan grafik menggunakan Excel dengan memplotkan nilai $\log t$ vs $q_e - q_t$ untuk menentukan kinetika orde satu semu. Sedangkan kinetika orde dua semu diperoleh dengan memplotkan nilai t vs t/q_t . Hasil analisis kinetika adsorpsi Cu dan Fe dengan adsorben komersial dan sekam padi dapat dilihat pada Tabel 4.6.

Tabel 4. 6 Hasil Analisis Model Kinetika Adsorpsi Orde Satu Semu dan Orde Dua Semu

Jenis Adsorben	Loga m	Ukuran partikel (mesh)	Orde satu semu			Orde dua semu		
			Qe	K1	R ²	qe	K2	R ²
Karbon aktif komersial	Cu	10-20	50,049	$-2,0 \times 10^{-6}$	0,7953	0,085	0,377	0,998
		40-50	0,002	0,02	0,5543	0,043	0,729	0,9922
	Fe	10-20	2,59	-0,047	0,7519	$6,7 \times 10^{-4}$	-1001,7	0,9849
		40-50	6×10^{-4}	0,026	0,2497	0,794	4,1668	0,8751
Karbon aktif sekam Padi	Cu	10-20	0,007	0,017	0,6095	0,083	0,337	0,9992
		40-50	0,006	0,017	0,5689	0,087	0,444	0,9994
	Fe	10-20	$3,4 \times 10^{-5}$	0,037	0,7304	5×10^{-4}	-61,066	0,9673
		40-50	$9,6 \times 10^{-5}$	0,043	0,6745	8×10^{-4}	56,33	0,9932

(Hasil Analisis).

Hasil analisa kandungan Cu dan Fe dari masing-masing perlakuan dengan perbedaan waktu pengadukan adalah dasar yang digunakan untuk mengetahui kinetika adsorpsi dengan menggunakan adsorben. Berdasarkan Tabel 4.6. dapat diketahui bahwa keseluruhan variasi dan perlakuan yang diberikan pada proses adsorpsi menunjukkan bahwa model kinetika yang diikuti adalah model orde dua semu dengan koefisien korelasi rata-rata 0,99. Hal ini mengindikasikan bahwa proses adsorpsi yang terjadi adalah adsorpsi secara fisik membentuk lapisan multilayer. Mengacu pada Mahmud dkk, (2012), hampir sebagian besar

model kinetika adsorpsi cocok dengan model kinetika orde dua semu karena data adsorpsi untuk keseluruhan kisaran waktu kontak sebagian besar adalah adsorpsi dengan tingkat penyisihan kecil dan berlangsung lama.

Model orde dua semu adalah suatu pemodelan yang didasarkan pada kemampuan penjerapan pada fase solid dengan mekanisme *chemisorption* yang menjadi faktor pengontrol kecepatan adsorpsi. Kelebihan dari model orde dua semu yaitu dapat memprediksi 'kelakuan' ke depan yang berada diluar jangkauan dari kajian ini, dimana pada umumnya model orde satu semu hanya sesuai untuk permulaan reaksi (Yesim dan Yucel, 2002).

Berdasarkan kajian model isoterm adsorpsi logam Cu menggunakan karbon aktif komersial dan sekam padi maka diketahui bahwa adsorben dengan kapasitas penyerapan terbesar adalah sekam padi. Nilai x/m adsorben sekam padi sebesar 0,015 mg/g sedangkan adsorben komersial sebesar 0,008 mg/g. Hasil analisis juga menunjukkan bahwa ukuran partikel adsorben 10-20 mesh dan 40-50 mesh tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kapasitas penyerapan ion logam. Oleh sebab itu proses adsorpsi secara kontinu dilakukan menggunakan adsorben sekam padi berukuran 10-20 mesh.

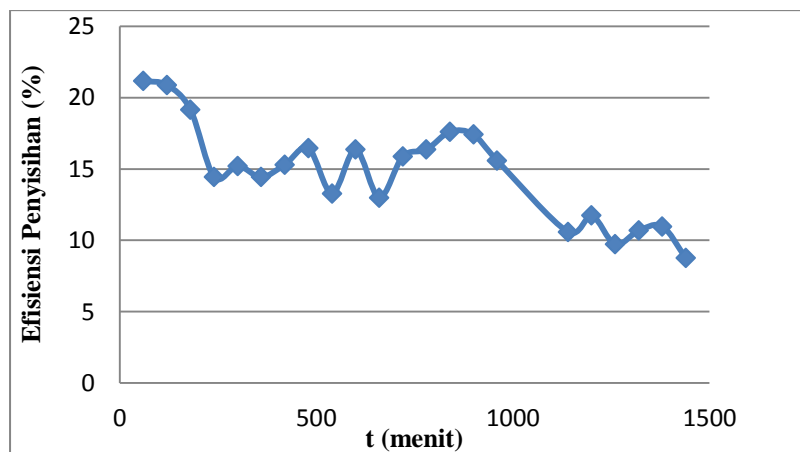
Pada penelitian ini juga dilakukan pengujian kinetika adsorpsi menggunakan satu reaktor berisi sampel limbah. Pengujian kadar logam Cu dilakukan setiap jam. Penentuan orde reaksi dan konstanta dilakukan untuk melihat laju atau kecepatan reaksi yang terjadi dalam reaktor. Hasil perhitungan pada Lampiran B-5 memberikan hasil orde reaksi yang sesuai pada percobaan ini adalah reaksi orde dua dengan nilai K sebesar 0,0089 mg/l/jam. Apabila suatu reaksi berorde dua terhadap suatu pereaksi berarti laju reaksi itu berubah secara kuadrat terhadap perubahan konsentrasinya.

4.3.5 Adsorpsi Kontinu

Hasil penelitian yang optimum pada metode *batch* dapat digunakan sebagai acuan dalam model adsorpsi kontinu. Dengan model adsorpsi kontinu dapat mempermudah penerapan hasil penelitian dalam kehidupan sehari-hari atau dalam skala yang lebih besar. Ukuran partikel yang digunakan pada proses adsorpsi kontinu adalah ukuran 10-20 mesh. Hal ini dikarenakan ukuran media

yang efisiensinya paling besar pada proses batch yang digunakan pada proses kolom kontinyu (Reynolds dan Richard, 1996). Selain itu, pada Tabel 4.3 menunjukkan variasi ukuran partikel adsorben karbon aktif terhadap penyerapan logam Cu tidak memberikan perbedaan yang signifikan.

Limbah hasil presipitasi pada pH 7 dengan konsentrasi Cu sebesar 10,39 mg/l digunakan sebagai influen proses adsorpsi kontinyu. Proses adsorpsi kontinyu yang dilakukan dapat mengurangi konsentrasi logam Cu dalam larutan sampel. Dosis adsorben yang digunakan dalam tahap ini adalah 17,59 g dengan tinggi media adsorben 10,4 cm. Efisiensi penyisihan Cu berkisar antara 8,75-21,17%. Grafik penurunan efisiensi penyisihan Cu disajikan pada Gambar 4.3.

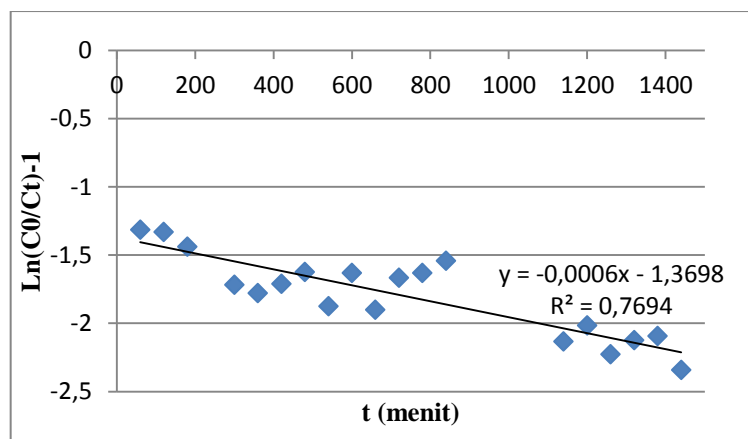


Gambar 4.3 Grafik efisiensi penyisihan Cu pada sistem kontinyu (Hasil Analisis).

Gambar 4.3 menunjukkan bahwa semakin lama waktu pengolahan maka efisiensi penyisihan semakin kecil. Hal ini dipengaruhi kondisi zona transfer massa. Ketika air limbah melewati kolom yang berisi adsorben dengan tinggi yang sama dengan zona transfer massa, maka konsentrasi kontaminan pada air limbah akan berkurang sampai jumlah minimum (Fajrianti dkk., 2016). Efisiensi penyisihan logam tertinggi hanya 21,17% menandakan bahwa penyisihan Cu secara kontinyu dalam penelitian ini tergolong rendah. Kondisi ini dimungkinkan karena kapasitas penyerapan sekam padi yang kecil yaitu 0,0158 mg/g serta adanya kandungan logam Fe dalam sampel menyebabkan terjadinya kompetisi penyerapan zat-zat adsorbat oleh adsorben.

a. Model Thomas

Model Thomas merupakan salah satu model teori kinerja kolom yang umum digunakan. Konstanta kinetik (K_{Th}) dan kapasitas adsorpsi kolom (q_0) model Thomas pada percobaan adsorpsi logam Cu diperoleh dengan membuat grafik hubungan antara $\ln(C_0/C_t-1)$ vs t (Gambar 4.4).



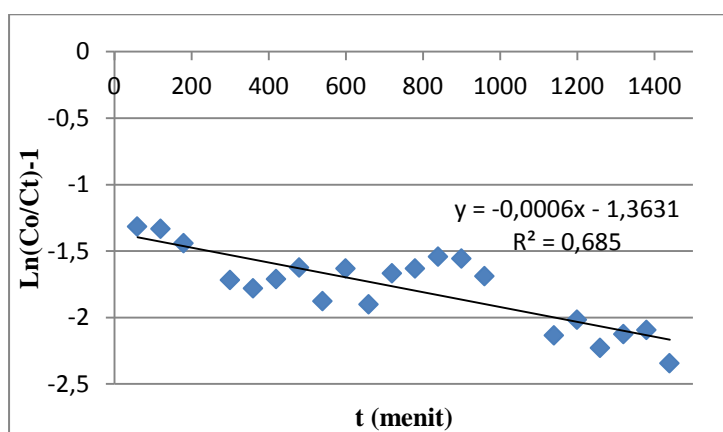
Gambar 4.4 Grafik hubungan waktu dan $\ln(C_0/C_t-1)$ pada model Thomas (Hasil Analisis).

Berdasarkan Gambar 4.4 diperoleh nilai konstanta kinetik (K_{Th}) sebesar -0,000058 dan kapasitas adsorpsi (q_0) yaitu 27,396 mg/g. Hasil ini menunjukkan kinerja adsorpsi kontinyu yang rendah. Kapasitas adsorpsi yang dihasilkan melalui analisis isoterm pada proses *batch* dan kontinyu berbeda. Berdasarkan perhitungan diketahui nilai kapasitas adsorpsi kontinyu lebih besar daripada *batch*. Hal ini menunjukkan bahwa proses adsorpsi secara kontinyu lebih cocok diterapkan daripada proses *batch*. Akan tetapi hal ini tidak bisa dibandingkan karena faktor konsentrasi awal (C_0) yang digunakan berbeda dan massa adsorben juga berbeda (Atminingtyas dkk., 2016).

Kapasitas adsorpsi dipengaruhi oleh tinggi media adsorben dimana semakin tinggi media adsorben maka terdapat *binding sites* yang makin besar. Kondisi ini meningkatkan penyerapan zat adsorbat oleh adsorben karena semakin tinggi media adsorben berarti laju perpindahan adsorbat dari larutan ke adsorben semakin cepat.

b. Model Bohart-Adam

Perhitungan konstanta laju adsorpsi dan harga kapasitas jerap pada adsorpsi logam Cu menggunakan sekam padi secara kontinyu dilakukan dengan menggunakan model Borart-Adam dengan membuat grafik hubungan antara $\ln(C_0/C_t-1)$ vs t . Grafik hubungan konstanta laju adsorpsi (K) dan kapasitas jerap adsorben (N_0) dalam penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 4.5.

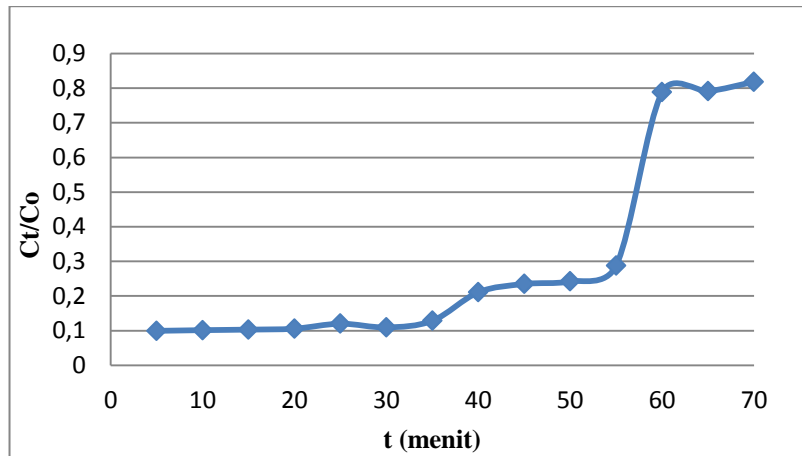


Gambar 4.5 Grafik hubungan waktu dan $\ln(C_0/C_t-1)$ pada model Bohart-Adam (Hasil Analisis).

Berdasarkan Gambar 4.5 dapat ditentukan konstanta laju adsorpsi (K) dan kapasitas penyerapan logam Cu oleh adsorben (N_0) dengan menggunakan persamaan Bohart-Adam (17). Konstanta laju adsorpsi yang diperoleh yaitu $-5,77 \times 10^{-5}$ dan kapasitas adsorpsi karbon (N_0) adalah $2871,69 \text{ mg/ml} = 2871690 \text{ mg/l}$. Percobaan adsorpsi kontinyu mengikuti model Bohart-Adam memiliki nilai R^2 sebesar 0,685 menunjukkan bahwa tingkat kesesuaian model ini dengan data hasil penelitian tergolong rendah. Oleh karena dapat dikatakan bahwa hasil perhitungan kapasitas penyerapan tidak cocok dengan hasil penelitian dan model Bohart-Adam tidak tepat untuk mendeskripsikan kinetika kolom adsorpsi yang terjadi.

Berdasarkan hasil analisis konsentrasi logam Cu pada waktu 1 jam (60 menit) diperoleh konsentrasi Cu efluen sebesar $8,19 \text{ mg/l}$. Efluen Cu ini telah mencapai kondisi *breakthrough*. Oleh sebab itu dilakukan pengujian lagi terhadap sampel sebelum waktu 60 menit untuk mengetahui kinerja kolom adsorpsi melalui

kurva *breakthrough*. Dari hasil analisis konsentrasi logam dibuat kurva *breakthrough* yang disajikan pada Gambar 4.6 berikut.



Gambar 4.6 Kurva *breakthrough* (Hasil Analisis).

Proses adsorpsi kontinyu dengan laju alir 20 ml/menit menunjukkan kondisi *breakthrough* terjadi secara bertahap. Nilai Ct/Co semakin lama semakin meningkat, hal ini berarti bahwa konsentrasi logam Cu yang terserap oleh adsorben semakin menurun, dan akibatnya konsentrasi logam Cu dalam efluen semakin meningkat. Berdasarkan kurva *breakthrough* yang diperoleh dapat dilihat bahwa pada waktu 60 menit telah terjadi *breakthrough* dengan konsentrasi efluen sebesar 8,19 mg/l mendekati konsentrasi influen yaitu 10,39 mg/l. Waktu yang dicapai pada kondisi *breakthrough* sangat singkat. Hal ini menunjukkan kinerja adsorpsi kontinyu yang kurang baik dan proses adsorpsi berlangsung singkat. Rendahnya kinerja proses adsorpsi ini dipengaruhi oleh ketebalan adsorben. Menurut Zhang dkk., (2011), waktu kontak antara adsorben dan adsorbat akan meningkat seiring dengan peningkatan tebal adsorben, sehingga meningkatkan efektifitas penyisihan adsorbat.

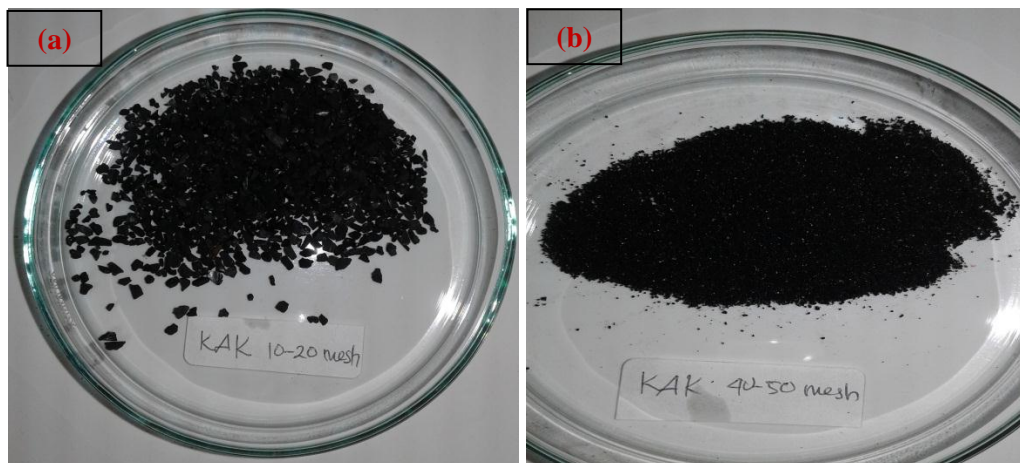
4.4 Karakterisasi Morfologi Permukaan Adsorben Karbon Aktif dengan Analisis SEM-EDX

Analisis SEM (*Scanning Electron Microscope*) berfungsi untuk mengetahui gambaran struktur permukaan dan ukuran partikel dari masing-masing adsorben. Sementara analisis EDX (*Energy Dispersive Spectroscopy*) berfungsi untuk mengetahui komposisi kimia dari permukaan adsorben secara

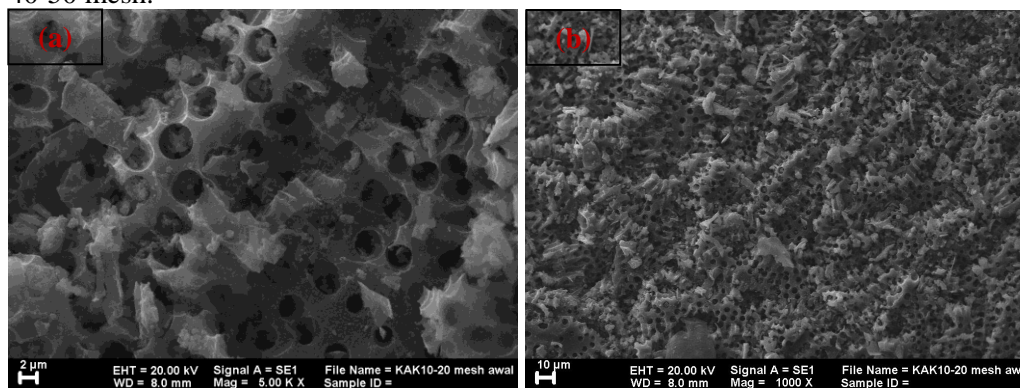
kuantitatif. Analisis ini dilakukan terhadap adsorben sebelum dan setelah digunakan dalam proses adsorpsi. Dari analisis ini dapat dilihat perbandingan permukaan karbon aktif berdasarkan gambar mikrograf SEM.

4.4.1 Analisis SEM Karbon Aktif Komersial

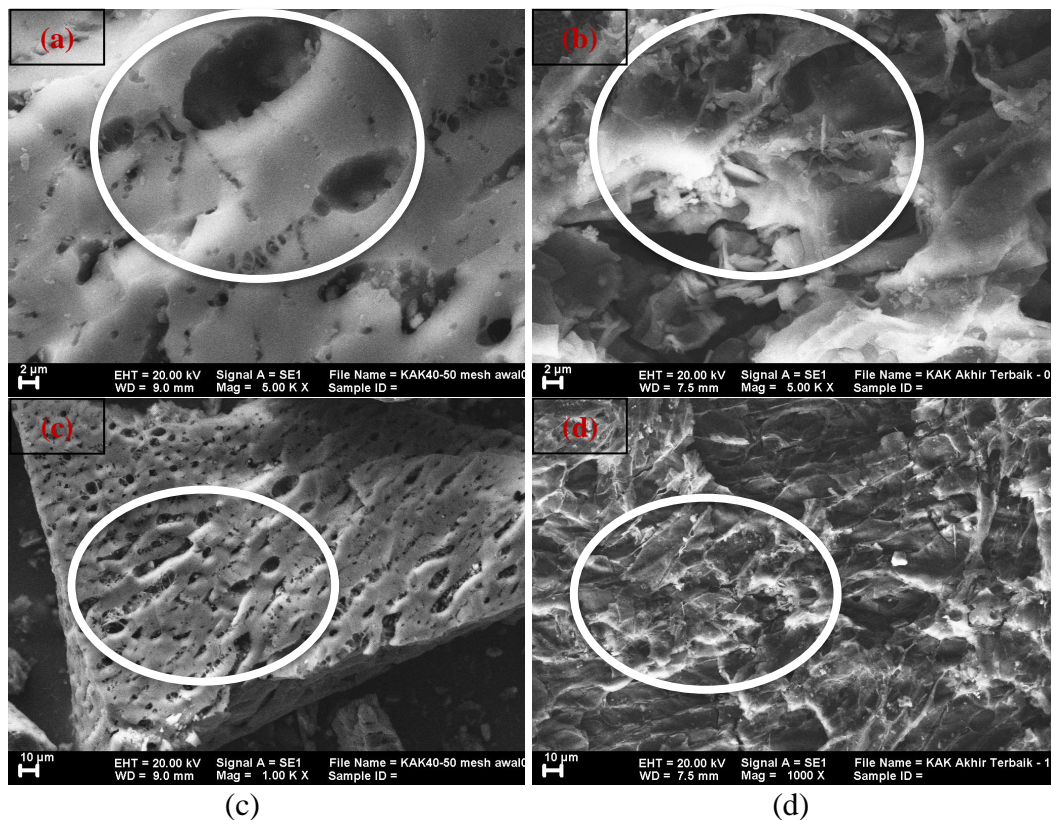
Karakterisasi karbon aktif komersial dilakukan terhadap partikel berukuran 10-20 mesh dan 40-50 mesh. Dalam analisis ini digunakan dua perbandingan skala yaitu perbesaran 5.000 kali dan 1.000 kali untuk melihat distribusi pori pada permukaan partikel karbon aktif. Adapun hasil karakteristik karbon aktif komersial dapat dilihat pada Gambar 4.7 sampai Gambar 4.9.



Gambar 4.7 Karbon aktif komersial (a) ukuran partikel 10-20 mesh; (b) ukuran partikel 40-50 mesh.



Gambar 4.8 Mikrograf SEM karbon aktif komersial ukuran 10-20 mesh sebelum digunakan (a) perbesaran 5.000 kali; (b) perbesaran 1.000 kali.



Gambar 4.9 Mikrograf SEM karbon aktif komersial ukuran 40-50 mesh (a) perbesaran 5.000 kali sebelum digunakan; (b) Perbesaran 5.000 kali setelah digunakan; (c) perbesaran 1.000 kali sebelum digunakan; (d) perbesaran 1.000 kali setelah digunakan.

Analisi SEM yang dilakukan di Laboratorium Energi dan Lingkungan-ITS menunjukkan perbedaan yang cukup signifikan terkait variasi ukuran partikel karbon aktif. Gambar 4.8 merupakan mikrograf SEM karbon aktif komersial dengan ukuran partikel 10-20 mesh sebelum digunakan dalam proses adsorpsi. Pada perbesaran 5.000 kali, karbon aktif dengan ukuran partikel 10-20 mesh menunjukkan pori yang besar dan masih kosong (Gambar 4.8 a). Pada perbesaran 1.000 kali terlihat distribusi pori atau rongga dalam jumlah yang banyak pada permukaan partikel karbon aktif (Gambar 4.8 b). Hal ini sesuai dengan penelitian Rochma (2017) dalam mikrograf SEM menunjukkan permukaan karbon aktif sebelum digunakan pada proses adsorpsi terdapat celah yang menjorok kedalam seperti tanah yang retak dan bentuk porinya tidak teratur.

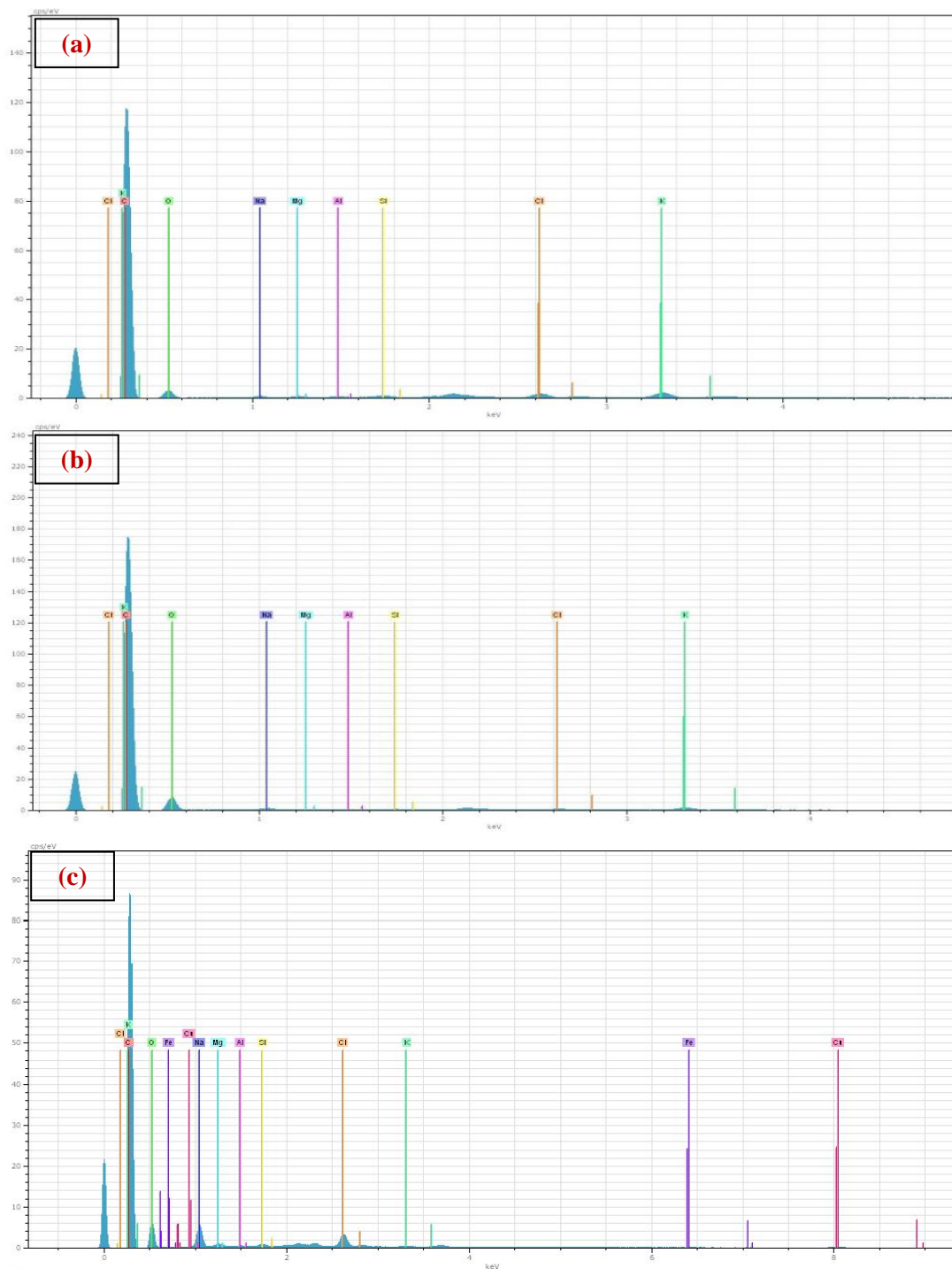
Gambar 4.9 (a dan c) merupakan mikrograf SEM karbon aktif komersial berukuran 40-50 mesh sebelum digunakan dalam proses adsorpsi. Pada perbesaran 5.000 kali, terlihat adanya pori atau rongga adsorben komersial

berukuran 40-50 mesh lebih besar dari ukuran 10-20 mesh. Perbedaan ini dilihat dari perbesaran gambar yang sama yaitu 5.000 kali. Begitupun pada perbesaran 1.000 kali, terlihat adanya pori yang lebih besar dari karbon aktif komersial berukuran 10-20 mesh. Akan tetapi persebaran pori pada partikel karbon aktif 40-50 mesh lebih sedikit dibanding ukuran 10-20 mesh. Perbedaan bentuk dan jumlah pori pada karbon aktif ini mempengaruhi proses penyerapan adsorbat. Hal ini disebabkan karena pori atau rongga tersebut yang akan menjadi tempat teradsorpsinya ion logam pada proses penyisihan logam dalam limbah cair industri. Pori ini terbentuk pada proses karbonisasi dimana terjadi pemutusan rantai karbon sehingga senyawa-senyawa volatil menguap dan meninggalkan ruang-ruang kosong (pori) (Asuquo dkk., 2017).

Gambar 4.9 (b dan d) merupakan mikrograf SEM karbon aktif komersial setelah digunakan dalam proses penyerapan ion logam yang menunjukkan adanya suatu lapisan atau selaput. Selaput tersebut adalah adsorbat yang menempel pada permukaan karbon aktif sehingga pori-porinya menjadi tertutup. Adsorbat yang menempel tersebut adalah logam Cu tersisa yang terdapat pada sampel limbah hasil proses presipitasi. Struktur porositas karbon aktif ini menjadikannya dapat menyerap adsorbat. Adsorbat akan terserap masuk dalam pori-pori karbon aktif. Gambaran permukaan padatan karbon aktif baik pada perbesaran 5.000 maupun 1.000 kali menunjukkan adanya distribusi pori pada permukaan luar hingga bagian dalamnya. Keberadaan pori-pori tersebut menjelaskan bahwa proses adsorpsi yang terjadi pada penelitian ini yaitu adsorpsi multilayer. Hal ini juga didukung dengan percobaan kinetika adsorpsi yang menunjukkan proses adsorpsi terjadi secara fisika dan membentuk lapisan multilayer (Benefield dkk., 1982).

4.4.2 Analisis EDX Karbon Aktif Komersial

Spektra EDX menunjukkan pola sebaran unsur-unsur yang terdapat dalam karbon aktif komersial ukuran 10-20 mesh dan 40-50 mesh. Spektra EDX disajikan pada Gambar 4.10 dan Tabel 4.7.



Gambar 4.10 Spektra EDX karbon aktif komersial (a) 10-20 mesh, sebelum digunakan; (b) 40-50 mesh, sebelum digunakan; (c) setelah digunakan.

Gambar 4.10 menunjukkan perbedaan spektra EDX hasil karakterisasi karbon aktif komersial sebelum digunakan (a dan b) dan setelah digunakan dalam proses adsorpsi. Berdasarkan spektra tersebut diketahui bahwa karbon aktif

komersial mengandung unsur karbon dan oksigen yang tersebar diseluruh permukaan karbon aktif. Berikut adalah persentase komposisi unsur yang terdapat pada karbon aktif komarsial.

Tabel 4.7 Hasil Uji EDX Karbon Aktif Komersial

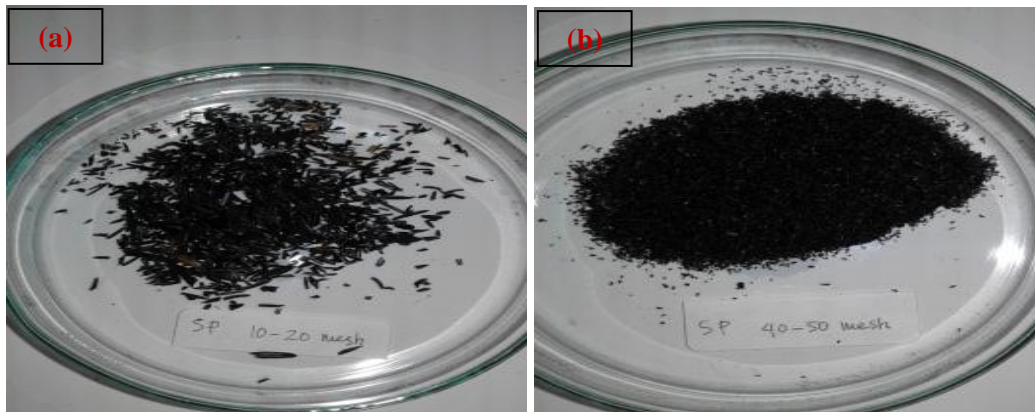
No	Unsur	Berat (%)		
		KAK 10-20 mesh	KAK 40-50 mesh	KAK setelah digunakan
1.	C	76,03	69,04	62,20
2.	O	21,02	28,49	29,36
3.	K	1,65	1,13	0,58
4.	Cl	0,91	0,38	1,97
5.	Na	0,18	0,74	4,24
6.	Si	0,15	0,06	0,18
7.	Mg	0,06	0,12	0,34
8.	Al	0,00	0,04	0,01
9.	Cu	-	-	1,00
10.	Fe	-	-	0,11

Sumber : Hasil Analisis.

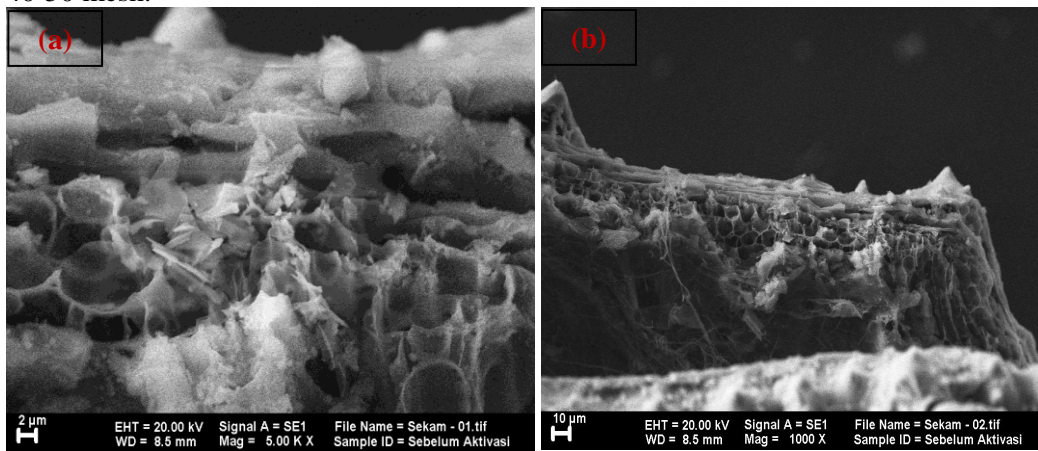
Berdasarkan Tabel 4.7 dapat dilihat bahwa telah terjadi penyerapan ion logam Cu dan Fe pada pori adsorben. Hal ditandai dengan adanya unsur Cu dan Fe pada adsorben yang telah digunakan dalam proses adsorpsi.

4.4.3 Analisis SEM Karbon Aktif Sekam Padi

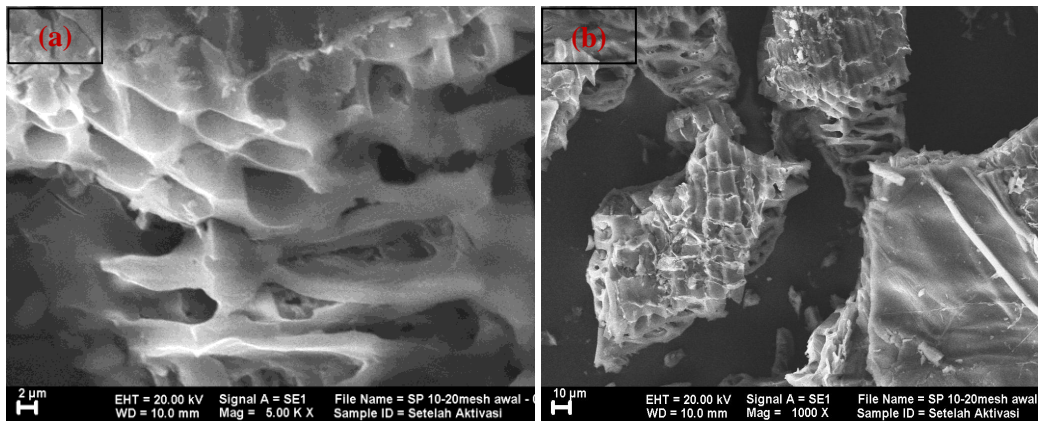
Pengujian struktur mikro karbon aktif sekam padi menggunakan SEM dilakukan pada beberapa sampel yaitu karbon (sebelum diaktivasi), karbon aktif proses fisika-kimia (setelah diaktivasi) dan karbon aktif setelah digunakan pada proses adsorpsi. Sampel yang digunakan berukuran 10-20 mesh dan 40-0 mesh (Gambar 4.8). Hasil pengujian SEM pada beberapa sampel adsorben sekam padi dapat dilihat pada Gambar 4.11 sampai 4.15.



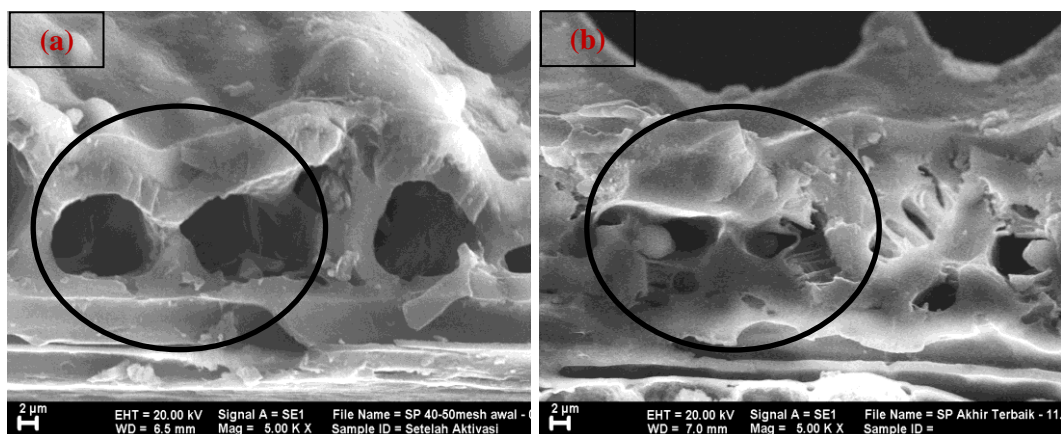
Gambar 4.11 Karbon aktif sekam padi (a) ukuran partikel 10-20 mesh; (b) ukuran partikel 40-50 mesh.



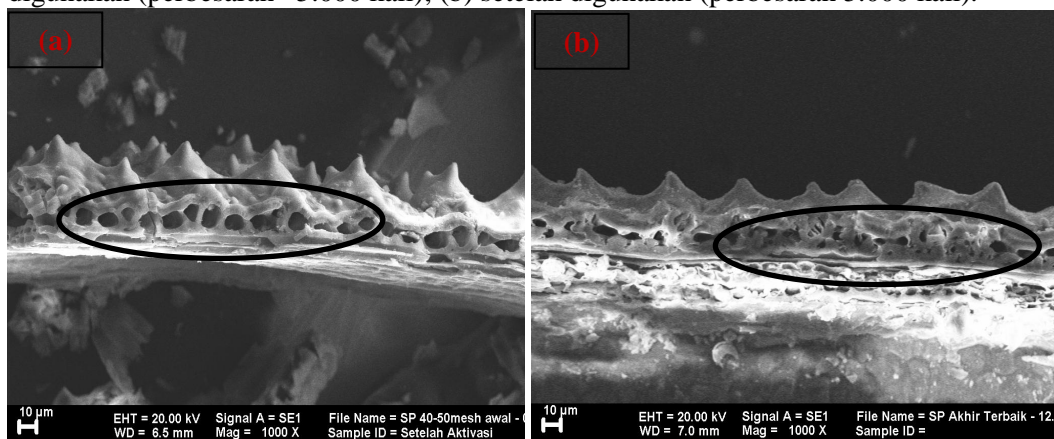
Gambar 4.12 Mikrograf SEM karbon sebelum diaktivasi (a) Perbesaran 5.000 kali; (b) Perbesaran 1.000 kali.



Gambar 4.13 Mikrograf SEM karbon aktif sekam padi ukuran 10-20 mesh setelah aktivasi (a) perbesaran 5.000 kali; (b) perbesaran 1.000 kali.



Gambar 4.14 Mikrograf SEM karbon aktif sekam padi ukuran 40-50 mesh (a) sebelum digunakan (perbesaran 5.000 kali); (b) setelah digunakan (perbesaran 5.000 kali).



Gambar 4.15 Mikrograf SEM karbon aktif sekam padi ukuran 40-50 mesh (a) sebelum digunakan (perbesaran 1.000 kali); (b) setelah digunakan (perbesaran 1.000 kali).

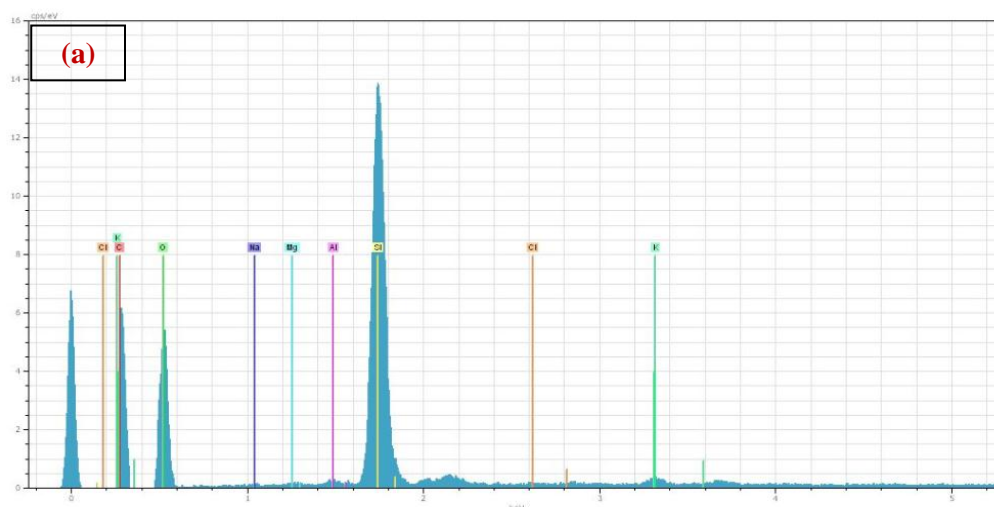
Gambar 4.11 sampai 4.15 menunjukkan morfologi permukaan yang dihasilkan untuk beberapa sampel adsorben karbon aktif sekam padi dengan perbesaran 5.000 kali dan 1.000 kali. Morfologi permukaan arang sekam padi sebelum diaktivasi (Gambar 4.12) terlihat sebagian pori-pori yang terdapat dalam karbon masih tertutup oleh hidrokarbon dan senyawa organik (pengotor) lainnya. Pada perbesaran 1.000 kali terlihat distribusi pori pada partikel karbon namun pori-pori tersebut belum terbuka secara sempurna karena belum dilakukan proses aktivasi untuk menghilangkan pengotornya. Komponen karbon ini meliputi karbon terikat, abu, air dan nitrogen. Sementara pada mikrograf sekam padi setelah diaktivasi (Gambar 4.13 a dan 4.14 a) terlihat adanya pembentukan pori atau rongga yang tersusun teratur dan kosong. Pembentukan pori ini dapat dilihat pada partikel berukuran 10-20 mesh maupun 40-50 mesh. Hasil morfologi permukaan yang diperoleh pada karbon sebelum diaktivasi dan karbon aktif

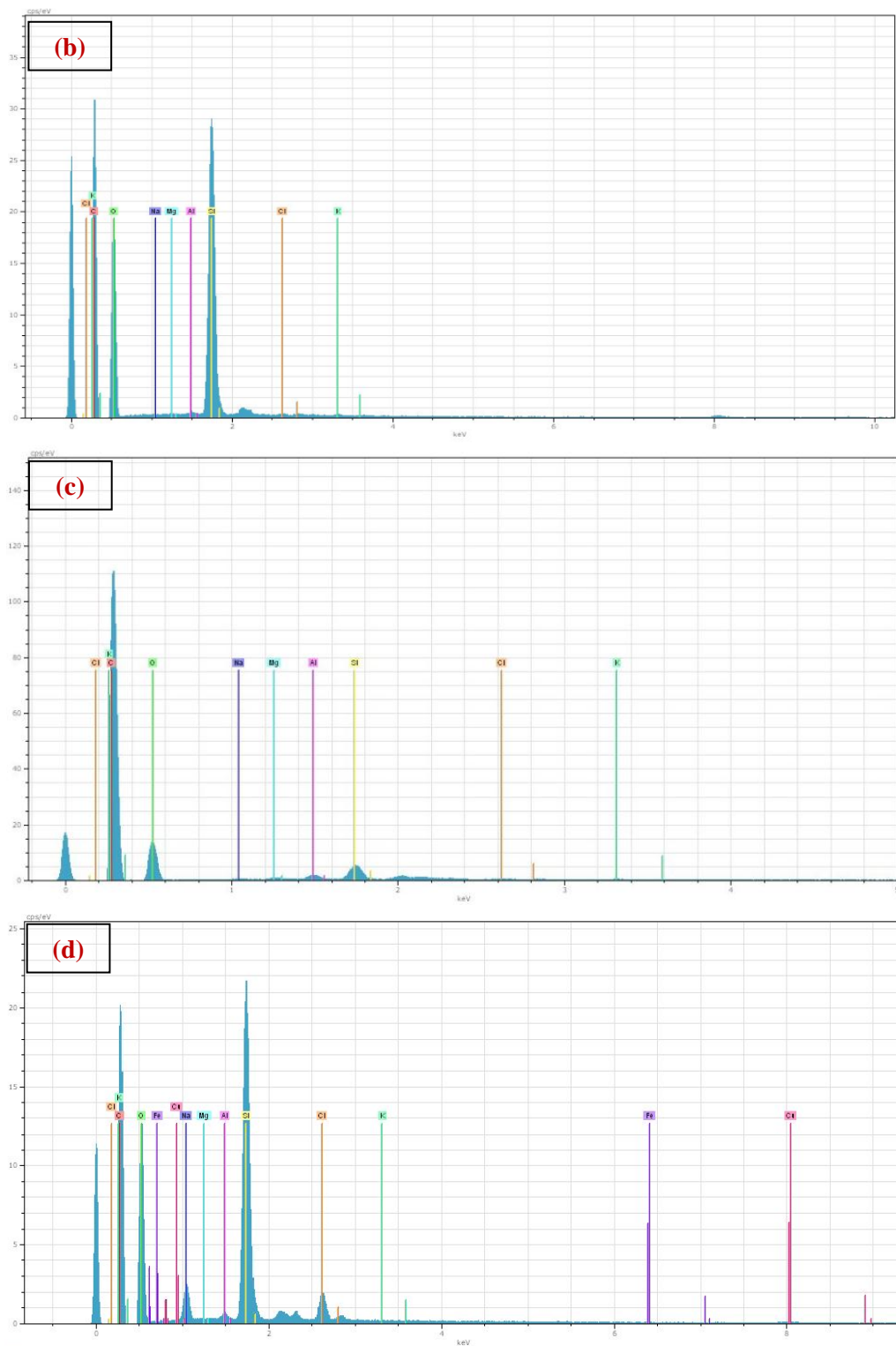
proses aktivasi fisik-kimia menunjukkan perbedaan ukuran dan jumlah pori yang terbentuk. Hal ini dikarenakan proses aktivasi dengan larutan HCl dapat melarutkan pengotor sehingga pori-pori lebih banyak terbentuk dan proses penyerapan adsorbat menjadi lebih maksimal (Hanum, 2017). Proses aktivasi menghasilkan luas permukaan karbon makin besar karena terjadi pemecahan ikatan hidrokarbon atau proses oksidasi molekul-molekul permukaan yang menyumbat pori-pori (Wirani 2017). Pembentukan pori yang baik dapat meningkatkan kemampuan penyerapan dari karbon aktif untuk menghilangkan ion logam berat.

Hasil morfologi permukaan karbon aktif sekam padi setelah digunakan dalam penyerapan ion logam (Gambar 4.14 b dan 4.15 b) menunjukkan adanya selaput adsorbat yang menempel pada permukaan partikel sehingga pori-pori menjadi cenderung tertutup. Selaput ini adalah ion logam Cu dan Fe yang berasal dari sampel limbah. Keberadaan ion logam Cu dan Fe pada permukaan karbon aktif dapat dilihat dari hasil analisis EDX.

4.4.4 Analisis EDX Karbon Aktif Sekam Padi

Analisis EDX bertujuan untuk mengetahui kandungan unsur atau zat yang terdapat pada partikel adsorben. Pola sebaran unsur-unsur yang terdapat dalam karbon aktif sekam padi dapat dilihat pada Gambar 4.16 dan Tabel 4.8 berikut.





Gambar 4. 16 Spektra EDX karbon aktif sekam padi (a) Arang sekam sebelum aktivasi; (b) Setelah aktivasi ukuran partikel 10-20 mesh; (c) Setelah aktivasi ukuran partikel 40-50 mesh; (d) setelah digunakan.

Gambar 4.16 menunjukkan spektra EDX hasil karakterisasi karbon aktif sekam padi sebelum diaktivasi (a), setelah diaktivasi (b dan c) dan setelah digunakan dalam proses adsorpsi (d). Berdasarkan spektra tersebut diketahui bahwa karbon aktif sekam padi mengandung unsur karbon dan oksigen yang tersebar diseluruh permukaan karbon aktif. Hal tersebut menunjukkan silikon pada sekam padi terdapat sebagai silika (SiO_2) (Lata dan Samadder, 2014). Perbedaan yang signifikan pada sekam padi sebelum dan setelah aktivasi adalah pada kandungan Si yang meningkat dari 8,45% menjadi 19,41%. Berikut adalah persentase komposisi unsur yang terdapat pada karbon aktif sekam padi.

Tabel 4.8 Hasil Uji EDX Karbon Aktif Sekam Padi

No	Unsur	Berat (%)			
		SP sebelum aktivasi	SP 10-20 mesh	SP 40-50 mesh	SP setelah digunakan
1.	O	63,80	50,31	55,60	48,18
2.	C	27,65	29,44	40,47	28,01
3.	Si	8,45	19,41	2,28	16,40
4.	K	0,10	0,24	0,18	0,11
5.	Na	-	0,19	0,18	3,54
6.	Mg	-	0,04	0,31	0,07
7.	Cl	-	0,28	0,23	2,16
8.	Al	-	0,10	0,74	0,23
9.	Cu	-	-	-	1,07
10.	Fe	-	-	-	0,23

Sumber : Hasil Analisis.

Tabel 4.8 menunjukkan bahwa adsorben sekam padi telah menyerap logam Cu dan Fe. Dari data EDX diketahui perbedaan komposisi adsorben sekam padi sebelum dan setelah digunakan dalam proses adsorpsi dilihat dari kandungan unsur Cu dan Fe. Adsorben sekam padi sebelum proses adsorpsi tidak terdapat unsur Cu maupun Fe. Akan tetapi setelah proses adsorpsi ditemukan adanya unsur Cu dan Fe sebesar 1,07% dan 0,23%. Penyerapan ion logam Cu dan Fe pada permukaan adsorben dapat mengurangi kadar logam Cu dan Fe dalam sampel limbah cair industri perhiasan emas.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

1. Penyisihan logam Cu dan Fe limbah cair industri perhiasan emas dengan proses presipitasi memiliki efisiensi 99%. Sementara penyisihan logam dengan proses adsorpsi memiliki efisiensi yang kecil sehingga kurang tepat digunakan dalam adsorpsi senyawa anorganik seperti logam.
2. Model isoterm adsorpsi logam Cu menggunakan sekam padi (40-50 mesh) mengikuti model isoterm Freundlich dengan nilai R^2 0,9625 dan kinetika orde dua semu. Model isoterm adsorpsi logam Cu menggunakan karbon aktif komersial (40-50 mesh) juga mengikuti model isoterm Freundlich dengan nilai R^2 0,9949 dan kinetika orde dua semu.
3. Penyisihan logam Cu dalam proses kontinyu berlangsung singkat dengan waktu *breakthrough* 1 jam. Kinetika adsorpsi logam Cu secara kontinyu mengikuti model Thomas dengan nilai $R^2 = 0,7694$ serta kapasitas adsorpsi sebesar 27,396 mg/g.

5.2 Saran

1. Endapan yang dihasilkan dari proses presipitasi dapat diolah dengan metode solidifikasi/stabilisasi untuk menghasilkan material yang bermanfaat.
2. Perlu dilakukan pengujian kadar logam lain yang terdapat dalam sampel limbah untuk mengetahui pengaruh ion logam tersebut dalam proses pengolahan.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR PUSTAKA

- Adli Hadyan. (2012). Pengolahan Limbah Cair Laboratorium dengan Metode Presipitasi dan Adsorpsi untuk Penurunan Kadar Logam Berat. Skripsi. Universitas Indonesia. Depok.
- Alexander, D., Ryan, E., Anery, H., Fengchang, W. dan Dulasiri, A. (2017). Investigation of Simultaneous Adsorption Properties of Cd, Cu, Pb and Zn by Pristine Rice Husks using ICP-AES and LA-ICP-MS analysis. *Microchemical Journal*, 44(3), hal 446-455.
- Alfiany, H., Bahri, S., dan Nurakhirawati. (2013). Kajian Penggunaan Arang Aktif Tongkol Jagung Sebagai Adsorben Logam Pb Dengan Beberapa Aktivator Asam. *Jurnal Natural Science*, 2(3), hal. 75- 86.
- Andreas, R., Narsito, dan Noegrohati, S. (2006). Karakteristik Adsorpsi dalam Medium Air Tawar. *Jurnal Molekul*, 62(1), hal 1-9.
- APHA. (2005). *Standart Methods for The Examination of Water & Wastewater*. APHA. USA.
- Asuquo, E., Alastair, M., Petrus, M., Flor, S. dan Xiaolei, F. Adsorption of Cd(II) and Pb(II) ions from Aqueous Solution using Mesoporus Activated Carbon Adsorbent: Equilibrium, Kinetics and Characterisation Studies. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5(2017), hal. 679-698.
- Atminingtyas, S., Wiharyanto, O., dan Irawan, W. W. (2016). Pengaruh Konsentrasi Aktivator NaOH dan Tinggi Kolom pada Arang Aktif dari Kulit Pisang Terhadap Efektifitas Penurunan Logam Berat Tembaga (Cu) dan Seng (Zn) Limbah Cair Industri Elektroplating. *Jurnal Teknik Lingkungan*, 5(1), hal. 1-11.
- Bahl, B. S., Tuli, G. D., dan Bahl, A. (1997). *Essential of Physical Chemistry*. S. Chand and Company, Ltd, New Delhi.
- Banerjee, A., Shraboni, M., Augustine, L., Joshi, S.R., Tamal, M. dan Gopinath, H. (2016). Biosorptive Uptake of Fe^{2+} , Cu^{2+} and As^{5+} by Activated Biochar Derived from *Colocasia esculenta*: Isotherm, Kinetics, Thermodynamics, and Cost Estimation. *Journal of Advanced Research*, 7(2016), hal.597-610.
- Begum, A., Krishna, H. dan Irfanulla, K. (2009). Analysis of Heavy Metal in Water, Sediments and Fish Samples of Madivala Lakes of Bangalore, Karnataka. *International Journal of ChemTech Research*, 1(2), hal. 245-249.
- Benefield, L. D., Joseph, F. J. dan Barron, L. W. (1982). *Process Chemistry for Water and Wastewater Treatment*. Prentice-Hall, Inc, New Jersey.
- Bhatti, Z. A., Farhana, M., Sadia, Q., Jaferia, F., Romana, M. dan Yang- Guo, Z. (2015). Characterization of Toxic Metals Adsorption Isotherms on Activated Carbon using Locally Design Jar Test Apparatus. *Science, Technology and Development*, 2(34), hal. 109-113.
- Darmayanti, Rahman, N., Supriadi, *Jurnal Akademika Kimia: Adsorpsi Timbal (Pb) dan (Zink (Zn) dari Larutannya Menggunakan Arang Hayati*

- (Biocharcoal) Kulit Pisang Kepok Berdasarkan Variasi pH, 2012, 1(4), 159-165.
- Darmono. (2001). *Lingkungan Hidup dan Pencemaran : Hubungannya dengan Toksikologi Senyawa Logam*. UI Press, Jakarta.
- Eckenfelder, W. W. 1989, *Industrial Water Pollution Control*, 2nd ed., Mc Graw Hill Inc., New York.
- Efendi, H. (2003). *Telaah Kualitas Air bagi Pengelolaan Sumber Daya dan Lingkungan Perairan*. Kanisius, Yogyakarta.
- El-Moselhy, K., Magdi, A. A., Adel, A. dan Ahmed, E. A. (2017). Adsorption of Cu(II) and Cd(II) from Aqueous Solution by Using Rice Husk Adsorbent. *Physical Chemistry: An Indian Journal*, 12(2), hal. 65-78.
- El-Shafey, E. I. (2014). Removal of Zn (II) and Hg (II) from Aqueous Solution on a Carbonaceous Sorbent Chemically Prepared from Risk Husk. *Journal of Hazardous Materials*.
- Fajrianti, H., Wiharyanto, O. dan Wisnu, W. (2016). Pengaruh Waktu Perendaman dalam Aktivator NaOH dan Debit Aliran terhadap Penurunan Krom Total (Cr) dan Seng (Zn) pada Limbah Cair Industri Elektroplating dengan menggunakan Arang Aktif dari Kulit Pisang. *Jurnal Teknik Lingkungan*, 5(1), hal. 55-65.
- Fang, L., Li, L., Qu, Z., Zu, H., Xu, J. dan Yan, N. (2018). A Novel Method for the Sequential Removal and Separation of Multiple Heavy Metals from Wastewater. *Journal of Hazardous Materials*, 342 (2018), hal. 617-624.
- Fitriyah, A. W., Utomo, Y. dan Kusumaningrum, I. K. (2016). Analisis Kandungan Tembaga (Cu) dalam Air dan Sedimen di Sungai Surabaya. *Jurusan Kimia, FMIPA, Universitas Negeri Malang*.
- Hadiwidodo, M. (2008). Penggunaan Abu Sekam Padi sebagai Adsorben dalam Pengolahan Air Limbah yang Mengandung Logam Cu. *Jurnal Teknik Undip*, 29(1), hal. 55-62.
- Hameed, B. H. dan Ahmad, A. A. (2012). Fixed-bed Adsorption of Reactive Azo Dye Onto Granular Activated Carbon Prepared from Waste. *Journal of Hazardous Materials*, 175(2), hal. 298-303.
- Hanum, F., Bani, O. dan Wirani, L. I. (2017). Characterization of Activated Carbon from Rice Husk by HCl Activation and Its Application for Lead (Pb) Removal in Car Battery Wastewater. *Materials Science and Engineering*, 8(2017), hal. 67-79.
- Hsu, T. C. (2009). Experimental Assessment of Adsorption of Cu^{2+} and Ni^{2+} from Aqueous Solution by Oyster Shell Powder. *Journal of Hazardous Materials*, 171(1-3), hal. 995-1000.
- Hutomo, L. P., Sri, Y. W. dan Jarot, M. (2016). Studi Sebaran Konsentrasi Logam Berat Pb dan Cu dalam Sedimen di Perairan Pantai Kenjeran Surabaya. *Jurnal Oseanografi*, 5(2), hal. 277-285.

- Karnib, M., Ahmad, A., Hanafy, A. dan Zakia, O. (2014). Heavy Metals Removal using Activated Carbon, Silica and Silica Activated Carbon Composite. *Energy Procedia*, 50(2014), hal. 113-120.
- Keputusan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 51 Tahun 2004 tentang Baku Mutu Air Laut.
- Keputusan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 5 Tahun 2014 tentang Baku Mutu Air Limbah.
- Kurniaty, N. (2008). Kesetimbangan Adsorpsi Residu Minyak dari Limbah Cair Pabrik Minyak Sawit (POME) Menggunakan Gambut Aktif. Skripsi, Teknik Kimia, Fakultas Teknik UR. Pekanbaru
- Jamhari. (2009). Reduksi Logam Berat Hg, Ag dan Cr Limbah Laboratorium menggunakan Metode Presipitasi dan Adsorpsi. Skripsi, Institut Pertanian Bogor, Bogor.
- Lata, S. dan Samadder, S. (2014). Removal of Heavy Metals using Rice Husk: A Review. *International Journal of Environmental Research and Development*, 2(2014), hal. 165-170.
- Mahmud, Suprihanto, N., Tri, P. dan Prayatni, S. (2012). Adsorpsi Bahan Organik Alami (BOA) Air Gambut pada Tanah Lempung Gambut Alami dan Teraktivasi. *Jurnal Teknik*, 3(1), hal 36-45.
- Marshall, W. E. dan Mitchell, M., J. (2014). Agriculture by-product as Metal Adsorbent: Sorption Properties and Resistance to Mechanical Abrasion. *J. Chem Tech Biotechnology*, 66(3), hal. 192-198.
- Masduqi, A. dan Assomadi, A. F. (2012). Operasi dan Proses Pengolahan Air. ITS Press, Surabaya.
- Metcalf dan Eddy. (2003). *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*. Edisi ke-4. McGraw Hill Book Company, New York, USA.
- Mullick, A., Siddhartha, M. dan Sangita, B. (2017). Removal of Hexavalent Chromium from Aqueous Solutions by Low-Cost Rice Husk-Based Activated Carbon: Kinetic and Thermodynamic Studies. *Indian Chemical Engineer*, 31(2), hal. 69-79.
- Nugroho, M. D., Ganjar, S. dan Zainus, S. (2016). Studi Penurunan Kadar Logam Berat pada Limbah Cair dari Industri Pelapisan Logam dengan Proses Koagulasi-Flokulasi. Teknik Lingkungan Universitas Diponegoro, Semarang.
- Palar, H. (2012). Pencemaran dan Toksikologi Logam Berat. PT. Rineka Cipta, Jakarta.
- Palar dan Suhendrayatno. (1994). Toksikologi dan Pencemaran Lingkungan. PT. Rineka Cipta, Jakarta.
- Peraturan Gubernur Jawa Timur No. 52 Tahun 2014 tentang Baku Mutu Air Limbah Bagi Industri dan/atau Kegiatan Usaha Lainnya.

- Putri, A. S. N., Utomo, Y. dan Kusumaningrum. (2016). Analisis Kandungan Besi di Badan Air dan Sedimen Sungai Surabaya. Jurusan Kimia, FMIPA, Universitas Negeri Malang.
- Rahman, M. M., Awang, M., Mohosina, B. S., Kamaruzzaman, B. Y., Nil, W. B. dan Adnan, C. M. (2012). Waste Palm Shell Converted to High Efficient Activated Carbon by Chemical Activated Method and its Adsorption Capacity Tested by Water Filtration. APCBEE Procedia, 1(2), hal. 293-298.
- Rajagukguk, H., P. (2018). Sikap Warga Lebak Jaya 2 A-B-C Surabaya Mengenai Program Corporate Social Responsibility (CSR) UBS Peduli di PT Untung Bersama Sejahtera (UBS). Skripsi Fakultas Ilmu Komunikasi, Univ. Katolik Widya Mandala. Surabaya.
- Reynold, T. D. dan Richard, P. A. (1996). Unit Operations and Processes in Environmental Engineering, Second Edition. PWS Publishing Company, USA.
- Ruthven, D. M. (1984). Principles of Adsorption and Adsorption Processes. John Wiley & Sons, Inc, USA.
- Sari, S. H. J., Jessica, F. A. M. dan Guntur. (2017). Analisis Kandungan Logam Berat Hg dan Cu Terlarut Di Perairan Pesisir Wonorejo, Pantai Timur Surabaya. Jurnal Pendidikan Geograsi, Univ. Brawijaya. Malang.
- Sathasivam. K. dan Haris, M. R. H. M. (2012). Banana Trunk Fibers As An Efficient Biosorbent for the removal of Cd, Cu, Fe, and Zn from aqueous solution. Journal of the Chilean Chemical Society, 55(2), hal. 278-282.
- Sumada, K. (2006). Kajian Instalasi Pengolahan Air Limbah Industri Elektroplating yang Efisien. Jurnal Teknik Kimia, 1(1), hal. 26-35.
- Supriyantini, E. Dan Hadi, E. (2015). Kandungan Logam Berat Besi (Fe) pada Air, Sedimen dan Kerang Hijau (*Perna viridis*) di Peairan Tanjung Emas Semarang. Jurnal Kelautan Tropis, 18(1), hal. 38-45.
- Susiati, H., Yarianto, S., Ali, A. L. dan Yulizon, M. (2015). Kandungan Logam Berat (Cu, cr, Zn dan Fe) pada Terumbukarang di Perairan Pulau Panjang, Jepara. BATAN.
- Soemantojo, R. W., Praswasti, P. D. K., Wulan dan Yulianti. (2010). Presipitasi Bertahap Logam Berat Limbah Cair Industri Pelapisan Logam menggunakan Larutan Kaustik Soda. Skripsi. Fakultas Teknik, Universitas Indonesia. Depok.
- Taha, M. F., Kiat, C. F., Shahrarun, M. S. dan Raml, A. (2011). Removal of Ni (II), Zn (II) and Pb (II) Ions from Single Metal Aqueous Solution using Activated Carbon Prepared from Rice Husk. World Academy of Science. Engineering ang Technology, 3(2), hal. 60-71.
- Trisnawati, Anita. (2008). *Studi Kandungan Logam Berat Cadmium (Cd) pada Kerang Hijau (Mytilus Viridus) di Perairan Kawasan Pantai Kenjeran Surabaya*. Skripsi, Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim.

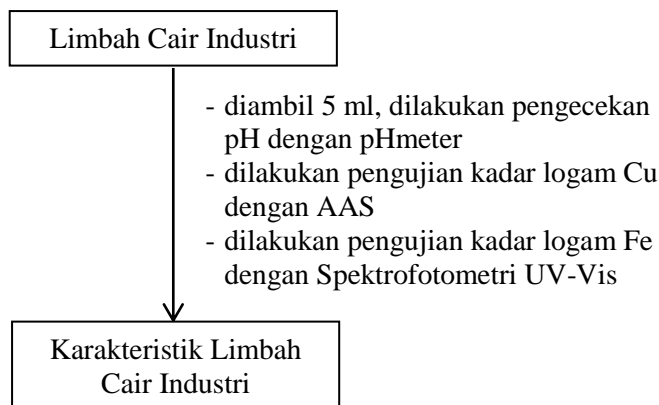
- Wardalia. (2016) karakterisasi pembuatan adsorben Dari sekam Padi Sebagai Pengadsorp Logam timbal pada limbah cair. Jurnal integrasi proses vol. 6, no. 2 (desember 2016) 83 - 88
- Wentz, C. A. (1995). Hazardous Waste Management, 2nd Edition. McGraw-Hill, New York.
- Wilyanda, Yelmida dan Chairul. (2015). Pengolahan Limbah Cair Loam Berat (Limbah B3) secara Presipitasi dan Koagulasi di UPT Pengujian Dina Pekerjaan Umum. Jom FTEKNIK , 2(2), hal.1-10.
- Wirani, Lulu. (2017). Aktivasi Karbon dari Sekam Padi dengan Aktivator Asam Klorida (HCl) dan Pengaplikasiannya pada Limbah Pengolahan Baterai Mobil untuk Mengurangi Kadar Timbah (Pb). Skripsi, Teknik Kimia, Universitas Sumatra Utara.
- Yelmida, A., Is, S . P. dan Cory, D. A. (2010). Kinetika Adsorpsi Logam Cu(II) pada Proses *Continue* dengan Adsorben Serbuk Gergaji Teraktivasi. ISBN 978-602-96729-0-9.
- Yesim Sag dan Yucel Aktay. (2002). Kinetic Studies on sorption of Cr(VI) and Cu(II) Ions by Chitin Chitosan and Rhizopus arrhizus. Biochemical Engineering Journal, 12(2), hal. 143-153.
- Yun, Y. S., Park, D., Park, J. M., dan Volesky, B. (2001). Biosorption of Trivalent Chromium on the Brown Seaweed Biomass. J. Environ. Sci. Technol, 35(2), hal. 4353-4358.
- Zhang, W., Lei, D., Han, Y., Haijiang, L., Ziwen, J., Xiaowei, K., Hu, Y., Aimin, L. dan Rongshi, C. (2011). Removal of Methylen Blue from Aqueous Solutions by Straw Based Adsorbent in a Fixed-Bed Column. Chemical Engineering Journal, 2(2011), hal. 429-436.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

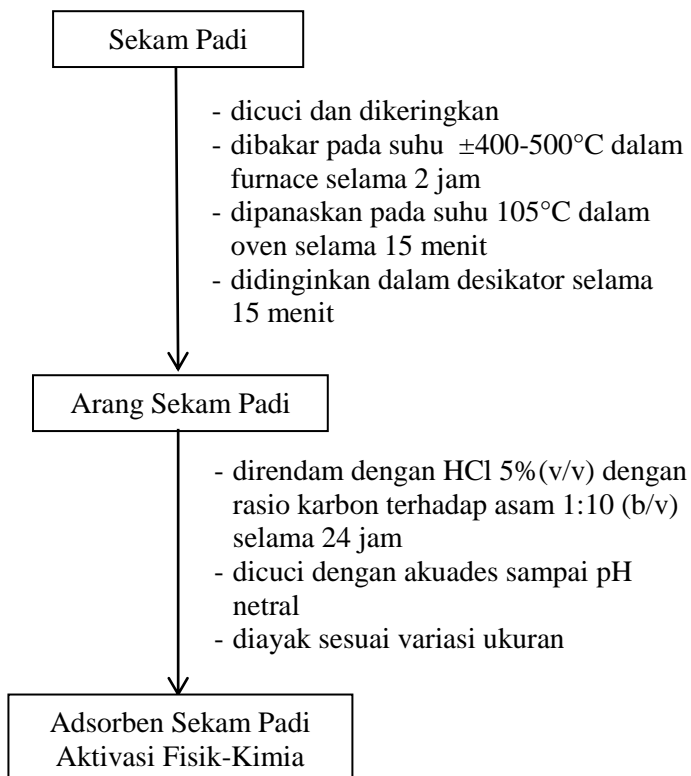
LAMPIRAN A

SKEMA KERJA

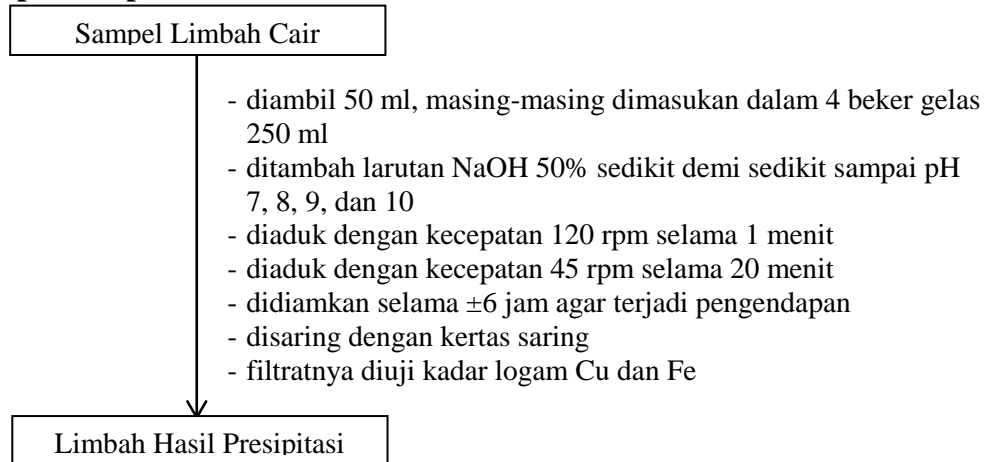
1. Karakteristik Limbah Cair Industri



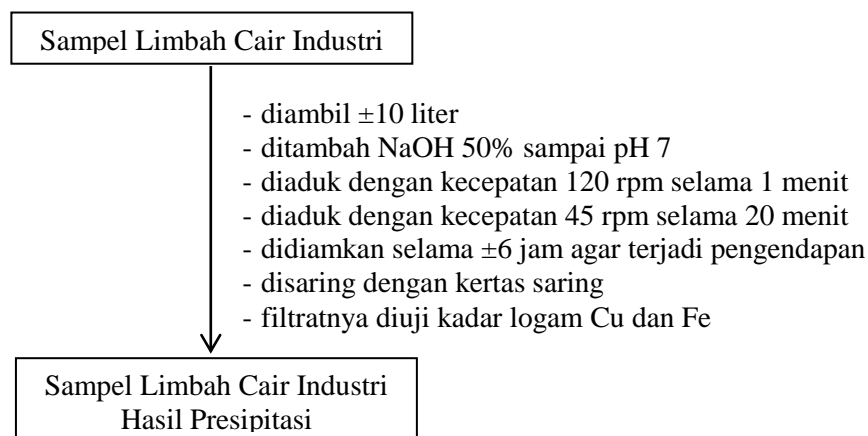
2. Pembuatan Adsorben Sekam Padi



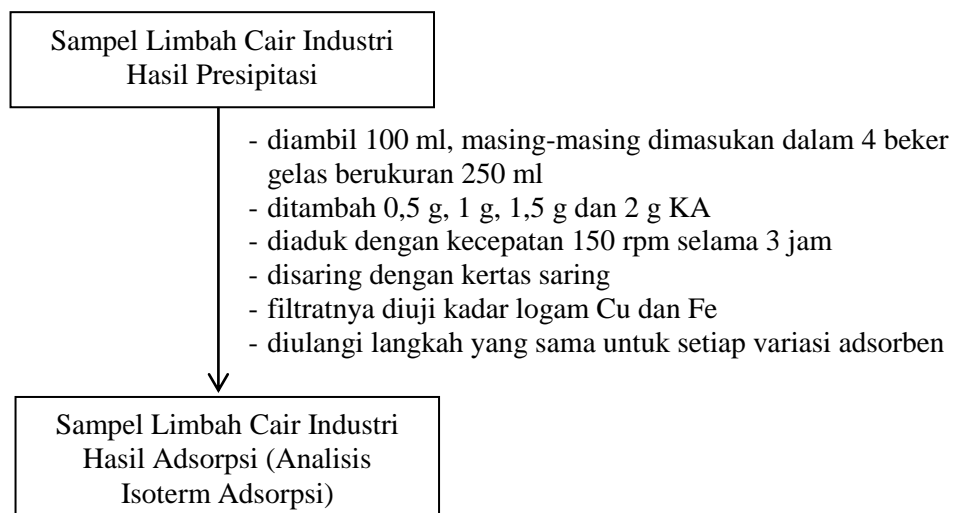
3. Proses Optimasi pH



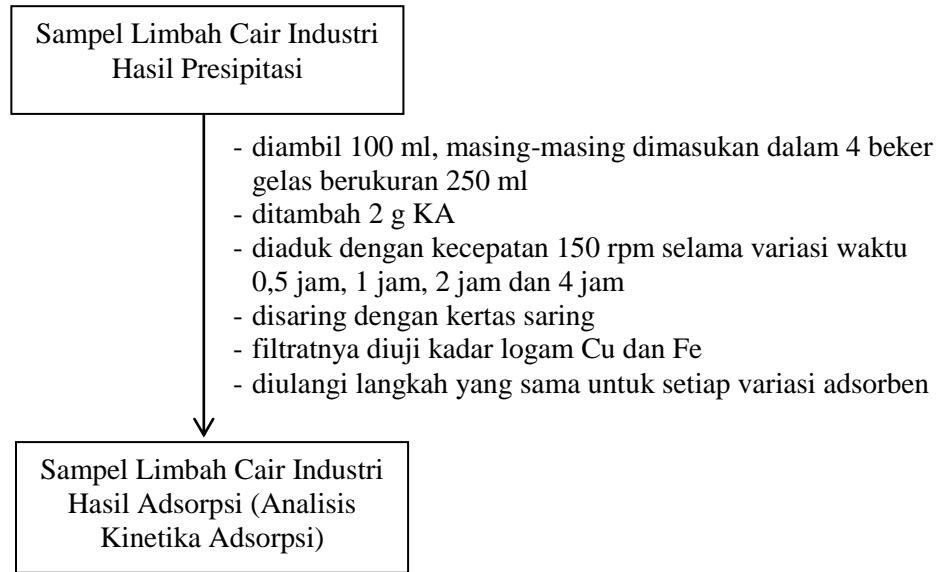
4. Proses Presipitasi



5. Proses Adsorpsi secara *Batch* (Isoterm Adsorpsi)



6. Proses Adsorpsi secara *Batch* (Kinetika Adsorpsi)



7. Proses Adsorpsi secara *Kontinyu*



“Halaman ini sengaja dikosongkan”

LAMPIRAN B

PERHITUNGAN

1. Perhitungan Standar Deviasi Logam Cu dan Fe

Berdasarkan data analisis dengan metode AAS diperoleh:

Cu in = 3.227 mg/l

Fe in = 1.837,50 mg/l

Cu ef = 1,9 mg/l (pengukuran pertama)

= 2,12 mg/l (pengukuran kedua)

= 2,66 mg/l (pengukuran ketiga)

= 2,01 mg/l (pengukuran keempat)

Fe ef = 0,02 mg/l (pengukuran pertama)

= 0,00 mg/l (pengukuran kedua)

= 0,028 mg/l (pengukuran ketiga)

= 0,01 mg/l (pengukuran keempat)

Tabel 1. Perhitungan standar deviasi konsentrasi Cu

<i>i</i>	<i>Xi</i>	<i>Xi</i> ²
1	1,9	3,61
2	2,12	4,49
3	2,66	7,07
4	2,01	4,04
Σ	8,69	19,22
Σ <i>Xi</i> ²	75,5161	

Nilai varian :
$$s^2 = \frac{(4).(19,22) - (75,5161)}{(4).(3)}$$

= 0,11

Standar deviasi : $s = \sqrt{0,11} = 0,33$

Tabel 2. Perhitungan standar deviasi konsentrasi Fe

<i>i</i>	<i>Xi</i>	<i>Xi</i> ²
1	0,02	0,0004
2	0	0
3	0,028	0,00078
4	0,01	0,0001
Σ	0,058	0,00128
Σ <i>Xi</i> ²	0,0033	

Rumus varian :
$$s^2 = \frac{(4).(0,00128) - (0,0033)}{(4).(3)}$$

= 0,00015

Standar deviasi : $s = \sqrt{0,00015} = 0,01$

2. Data Konsentrasi Logam (mg/l) Percobaan Isoterm dan Kinetika Adsorpsi

Tabel 4. Data Konsentrasi Logam (mg/l) Percobaan Isoterm Adsorpsi

Jenis Adsorben	Adsorbat	Ukuran partikel (mesh)	Dosis (g)			
			0,5	1	1,5	2
Karbon aktif komersial	Cu	10-20	1,9	1,871	1,786	1,74
		40-50	1,9	1,874	1,87	1,808
	Fe	10-20	0	0	0,006	0,004
		40-50	0,02	0,007	0,007	0,015
Karbon aktif sekam Padi	Cu	10-20	1,82	1,738	1,681	1,584
		40-50	1,871	1,844	1,757	1,582
	Fe	10-20	0	0	0	0
		40-50	0	0	0	0

Tabel 5. Data Konsentrasi Logam (mg/l) Percobaan Kinetika Adsorpsi

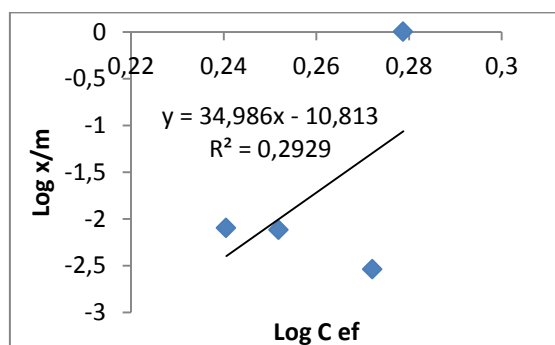
Jenis Adsorben	Adsorbat	Ukuran partikel (mesh)	Waktu (menit)			
			30	60	120	240
Karbon aktif komersial	Cu	10-20	1,062	0,813	0,484	0,395
		40-50	1,534	1,267	1,19	1,138
	Fe	10-20	0,004	0,004	0,008	0,006
		40-50	0,006	0,004	0,01	0,004
Karbon aktif sekam Padi	Cu	10-20	1,15	0,81	0,63	0,44
		40-50	0,92	0,72	0,45	0,32
	Fe	10-20	0,02	0,008	0,008	0,004
		40-50	0,011	0,006	0,004	0,004

3. Perhitungan Isoterm Adsorpsi Freundlich dan Langmuir

Model Isoterm Adsorpsi Freundlich (Cu, KAK, 10-20 mesh)

Waktu (jam)	Massa (g)	Vol (L)	Fe in (mg/l)	Fe ef (mg/l)	X (mg)	x/m (g/g)	Log C ef	Log x/m	1/C ef	1/(x/m)
3	0,5	0,1	1,9	1,9	0	0	0,27875	#NUM!	0,526316	#DIV/0!
3	1	0,1	1,9	1,871	0,0029	0,0029	0,27207	-2,537	0,534474	344,82
3	1,5	0,1	1,9	1,786	0,0114	0,0076	0,25188	-2,119	0,55991	131,57
3	2	0,1	1,9	1,74	0,016	0,008	0,24054	-2,096	0,574713	125

Log C ef	Log x/m
0,27875	#NUM!
0,27207	-2,537
0,25188	-2,119
0,24054	-2,096



Gambar 1a. Kurva model isoterm Freundlich

$$y = a + bx$$

$$y = 34,986x - 10,813$$

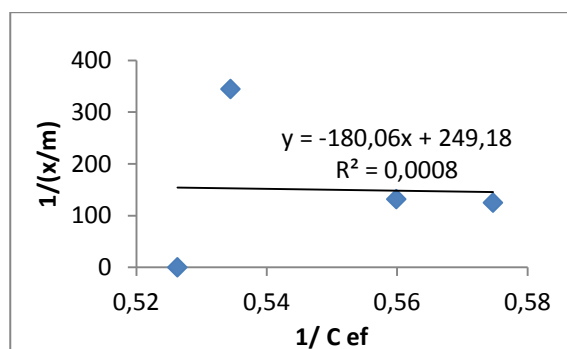
$$\log (q_e) = \log K + 1/n \log C_e$$

a	b
-10,813	34,986

n	K	R²
0,028583	$1,5 \times 10^{-11}$	0,2929

Model Isoterm Adsorpsi Langmuir (Cu, KAK, 10-20 mesh)

1/C _{ef}	1/(x/m)
0,526316	#DIV/0!
0,534474	344,8275862
0,55991	131,5789474
0,574713	125



Gambar 1b. Kurva model isoterm Langmuir

$$y = ax + b$$

$$y = -180,06x + 249,18$$

$$\frac{1}{qe} = \frac{1}{qm} \frac{1}{b} \frac{1}{C} + \frac{1}{qm}$$

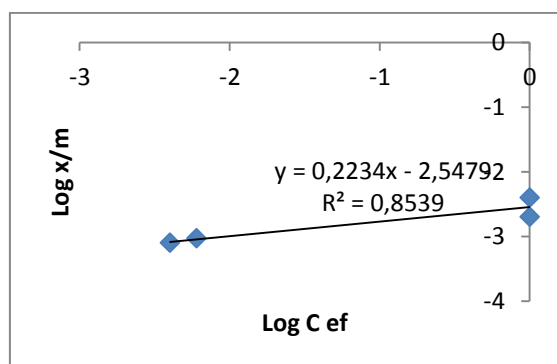
a	b
-180,06	249,18

qm	b	R ²
0,004013	-1,383872043	0,0008

Model Isoterm Adsorpsi Freundlich (Fe, KAK, 10-20 mesh)

Waktu (jam)	Massa (g)	Vol (L)	Fe in (mg/l)	Fe ef (mg/l)	X (mg)	x/m (g/g)	Log C _{ef}	Log x/m	1/C _{ef}	1/(x/m)
3	0,5	0,1	0,02	0	0,002	0,004	#NUM!	-2,3979	#DIV/0!	250
3	1	0,1	0,02	0	0,002	0,002	#NUM!	-2,6989	#DIV/0!	500
3	1,5	0,1	0,02	0,006	0,0014	0,000933333	-2,2218	-3,0299	166,6667	1071,4285
3	2	0,1	0,02	0,004	0,0016	0,0008	-2,3979	-3,0969	250	1250

Log C _{ef}	Log x/m
#NUM!	-2,39794
#NUM!	-2,69897
-2,22185	-3,02996
-2,39794	-3,09691



Gambar 2a. Kurva model isoterm Freundlich

$$y = a + bx$$

$$y = 0,2234x - 2,5479$$

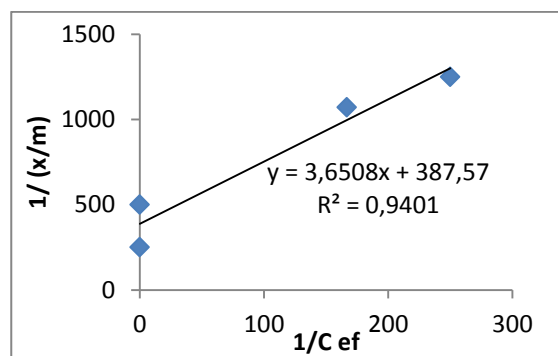
$$\log (q_e) = \log K + 1/n \log C_e$$

a	b
-2,5479	0,2234

n	K	R ²
4,476276	0,00283	0,8539

Model Isoterm Adsorpsi Langmuir (Fe, KAK, 10-20 mesh)

1/C ef	1/(x/m)
#DIV/0!	250
#DIV/0!	500
166,6667	1071,428571
250	1250



Gambar 2b. Kurva model isoterm Langmuir

$$y = ax + b$$

$$y = 3,6508x + 387,57$$

$$\frac{1}{qe} = \frac{1}{qm} \frac{1}{b} \frac{1}{C} + \frac{1}{qm}$$

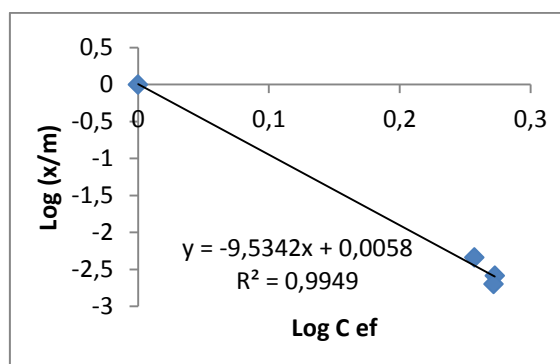
a	b
3,8508	387,57

qm	b	R²
0,00258	100,6466189	0,9401

Model Isoterm Adsorpsi Freundlich (Cu, KAK, 40-50 mesh)

Waktu (jam)	Massa (g)	Vol (L)	Fe in (mg/l)	Fe ef (mg/l)	X (mg)	x/m (g/g)	Log C ef	Log x/m	1/C ef	1/(x/m)
3	0,5	0,1	1,9	1,9	#VALUE!	#VALUE!	#VALUE!	#VALUE!	#VALUE!	#VALUE!
3	1	0,1	1,9	1,874	0,0026	0,0026	0,272	-2,585	0,533	384,615
3	1,5	0,1	1,9	1,87	0,003	0,002	0,271	-2,698	0,534	500
3	2	0,1	1,9	1,808	0,0092	0,0046	0,257	-2,337	0,553	217,391

Log C ef	Log x/m
#VALUE!	#VALUE!
0,27277	-2,585026652
0,271842	-2,698970004
0,257198	-2,337242168



Gambar 3a. Kurva model isoterm Freundlich

$$y = a + bx$$

$$y = -9,5342x + 0,0058$$

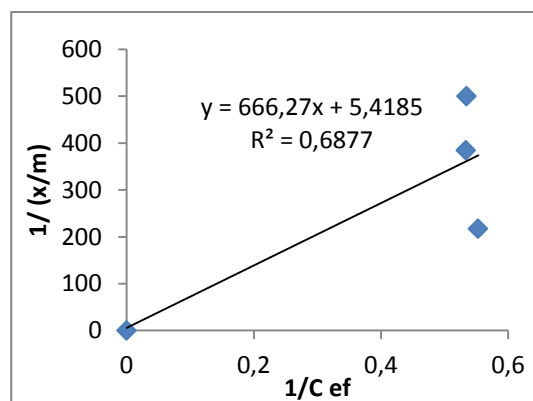
$$\log (q_e) = \log K + 1/n \log C_e$$

a	b
0,0058	-9,5342

n	K	R ²
-0,10488557	1,01344457	0,9949

Model Isoterm Adsorpsi Langmuir (Cu, KAK, 40-50 mesh)

1/C ef	1/(x/m)
#VALUE!	#VALUE!
0,53361793	384,6153846
0,534759358	500
0,553097345	217,3913043



Gambar 3b. Kurva model isoterm Langmuir

$$y = ax + b$$

$$y = 666,27x + 5,4185$$

$$\frac{1}{qe} = \frac{1}{qm} \frac{1}{b} \frac{1}{C} + \frac{1}{qm}$$

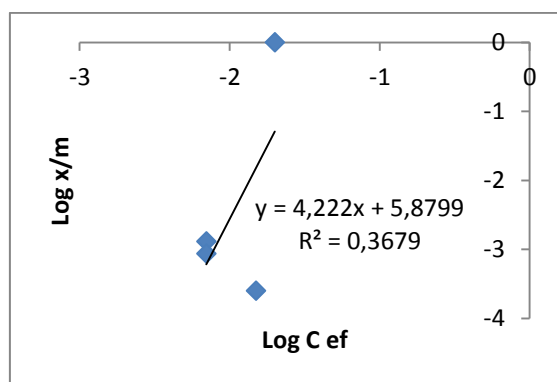
a	b
666,27	5,4185

qm	b	R ²
0,184552921	0,0081325	0,6877

Model Isoterm Adsorpsi Freundlich (Fe, KAK, 40-50 mesh)

Waktu (jam)	Massa (g)	Vol (L)	Fe in (mg/l)	Fe ef (mg/l)	X (mg)	x/m (g/g)	Log C _{ef}	Log x/m	1/C _{ef}	1/(x/m)
3	0,5	0,1	0,02	0,02	0	0	-1,69	#NUM!	50	#DIV/0!
3	1	0,1	0,02	0,007	0,0013	0,0013	-2,15	-2,886	142,85	769,23
3	1,5	0,1	0,02	0,007	0,0013	0,000866667	-2,15	-3,062	142,85	1153,84
3	2	0,1	0,02	0,015	0,0005	0,00025	-1,82	-3,602	66,66	4000

Log C _{ef}	Log x/m
-1,69897	#NUM!
-2,1549	-2,88606
-2,1549	-3,06215
-1,82391	-3,60206



Gambar 4a. Kurva model isoterm Freundlich

$$y = a + bx$$

$$y = 4,222x + 5,8799$$

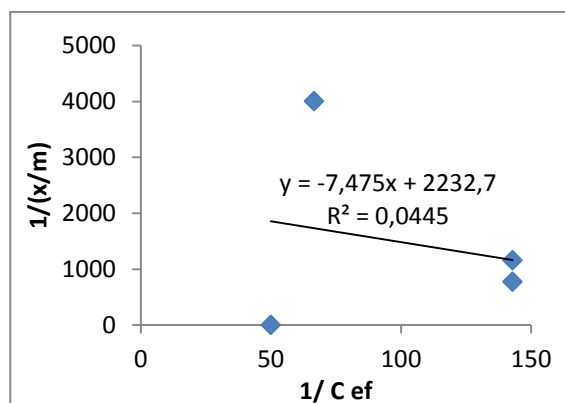
$$\log (q_e) = \log K + 1/n \log C_e$$

a	b
5,8799	4,222

n	K	R ²
0,236855	758402,9262	0,3679

Model Isoterm Adsorpsi Langmuir (Fe, KAK, 40-50 mesh)

1/C ef	1/(x/m)
50	#DIV/0!
142,8571429	769,2307692
142,8571429	1153,846154
66,66666667	4000



Gambar 4b. Kurva model isoterm Langmuir

$$y = ax + b$$

$$y = -7,475x + 2232,7$$

$$\frac{1}{qe} = \frac{1}{qm} \frac{1}{b} \frac{1}{C} + \frac{1}{qm}$$

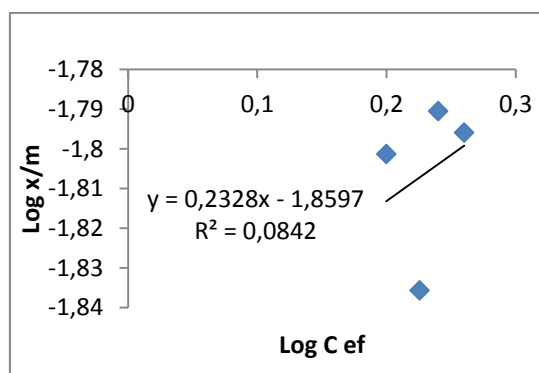
a	b
-7,475	2232,7

qm	b	R ²
0,000447888	-298,6889632	0,0445

Model Isoterm Adsorpsi Freundlich (Cu, SP, 10-20 mesh)

Waktu (jam)	Massa (g)	Vol (L)	Cu in (mg/l)	Cu ef (mg/l)	X (mg)	x/m (g/g)	Log C ef	Log x/m	1/C ef	1/(x/m)
3	0,5	0,1	1,9	1,82	0,008	0,016	0,2600	-1,7958	0,5494	62,5
3	1	0,1	1,9	1,738	0,0162	0,0162	0,2400	-1,7904	0,5753	61,72
3	1,5	0,1	1,9	1,681	0,0219	0,0146	0,2255	-1,8356	0,5948	68,49
3	2	0,1	1,9	1,584	0,0316	0,0158	0,1997	-1,8013	0,6313	63,29

Log C ef	Log x/m
0,26007139	-1,79588002
0,24004977	-1,79048499
0,22556771	-1,83564714
0,19975518	-1,80134291



Gambar 5a. Kurva model isoterm Freundlich

$$y = a + bx$$

$$y = 0,2328x - 1,8597$$

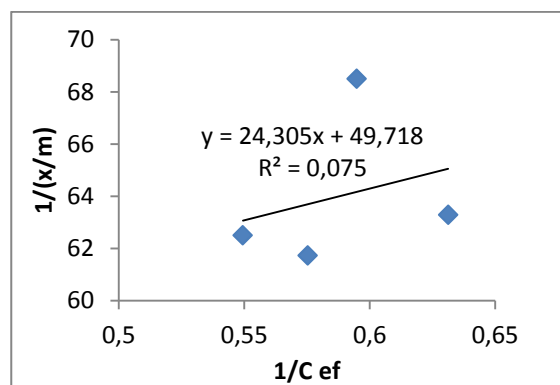
$$\log (qe) = \log K + 1/n \log Ce$$

a	B
-1,8597	0,2328

n	K	R²
4,29553265	0,01381338	0,0842

Model Isoterm Adsorpsi Langmuir (Cu, SP, 10-20 mesh)

1/C ef	1/(x/m)
0,549450549	62,5
0,575373993	61,7284
0,594883998	68,49315
0,631313131	63,29114



Gambar 5b. Kurva model isoterm Langmuir

$$y = ax + b$$

$$y = 24,305x + 49,718$$

$$\frac{1}{qe} = \frac{1}{qm} \frac{1}{b} \frac{1}{C} + \frac{1}{qm}$$

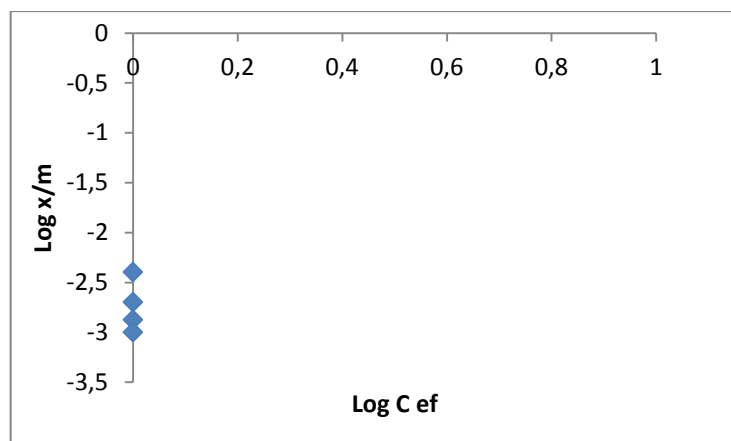
a	b
24,305	49,718

qm	b	R²
0,02011344	2,045587328	0,075

Model Isoterm Adsorpsi Freundlich (Fe, SP, 10-20 mesh)

Waktu (jam)	Massa (g)	Vol (L)	Fe in (mg/l)	Fe ef (mg/l)	X (mg)	x/m (g/g)	Log C _{ef}	Log x/m	1/C _{ef}	1/(x/m)
3	0,5	0,1	0,02	0	0,002	0,004	#NUM!	-2,397	#DIV/0!	250
3	1	0,1	0,02	0	0,002	0,002	#NUM!	-2,698	#DIV/0!	500
3	1,5	0,1	0,02	0	0,002	0,00133333	#NUM!	-2,875	#DIV/0!	750
3	2	0,1	0,02	0	0,002	0,001	#NUM!	-3	#DIV/0!	1000

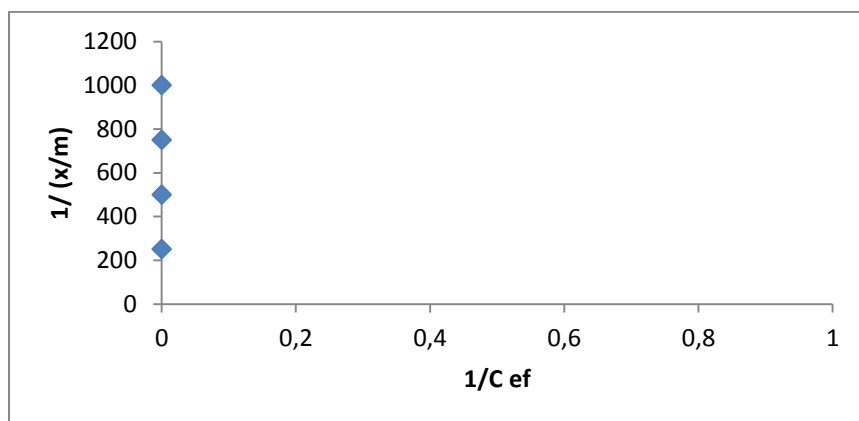
Log C _{ef}	Log x/m
#NUM!	-2,39794
#NUM!	-2,69897
#NUM!	-2,87506
#NUM!	-3



Gambar 6a. Kurva model isoterm Freundlich

Model Isoterm Adsorpsi Langmuir (Fe, SP, 10-20 mesh)

$1/C_{ef}$	$1/(x/m)$
#DIV/0!	250
#DIV/0!	500
#DIV/0!	750
#DIV/0!	1000

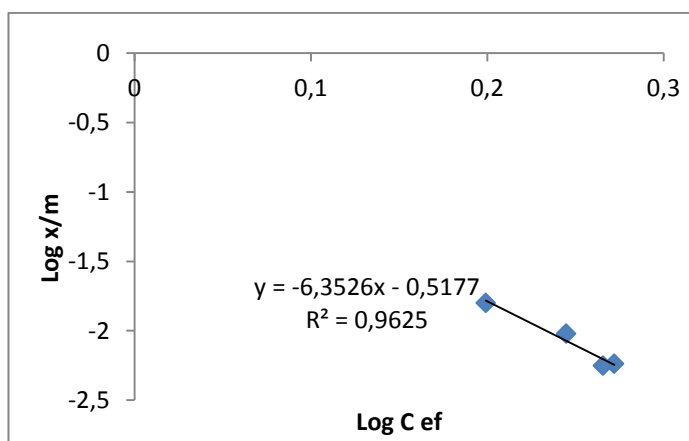


Gambar 6b. Kurva model isoterm Langmuir

Model Isoterm Adsorpsi Freundlich (Cu, SP, 40-50 mesh)

Waktu (jam)	Massa (g)	Vol (L)	Cu in (mg/l)	Cu ef (mg/l)	X (mg)	x/m (g/g)	Log C ef	Log x/m	1/C ef	1/(x/m)
3	0,5	0,1	1,9	1,871	0,0029	0,0058	0,2720	-2,236	0,534	172,413
3	1	0,1	1,9	1,844	0,0056	0,0056	0,2657	-2,251	0,542	178,571
3	1,5	0,1	1,9	1,757	0,0143	0,00953	0,2447	-2,020	0,569	104,895
3	2	0,1	1,9	1,582	0,0318	0,0159	0,1992	-1,798	0,632	62,893

Log C ef	Log x/m
0,272073788	-2,236572
0,265760917	-2,251812
0,244771761	-2,0207552
0,199206479	-1,7986029



Gambar 7a. Kurva model isoterm Freundlich

$$y = a + bx$$

$$y = -6,3526x - 0,5177$$

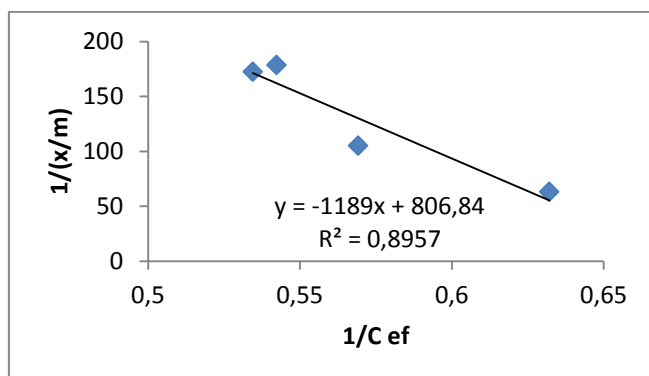
$$\log (q_e) = \log K + 1/n \log C_e$$

a	b
-0,5177	-6,3526

n	K	R ²
-0,157415861	0,303598765	0,9625

Model Isoterm Adsorpsi Langmuir (Cu, SP, 40-50 mesh)

1/C ef	1/(x/m)
0,534473544	172,4138
0,542299349	178,5714
0,569151964	104,8951
0,632111252	62,89308



Gambar 7b. Kurva model isoterm Langmuir

$$y = ax + b$$

$$y = -1189x + 806,84$$

$$\frac{1}{qe} = \frac{1}{qm} \frac{1}{b} \frac{1}{C} + \frac{1}{qm}$$

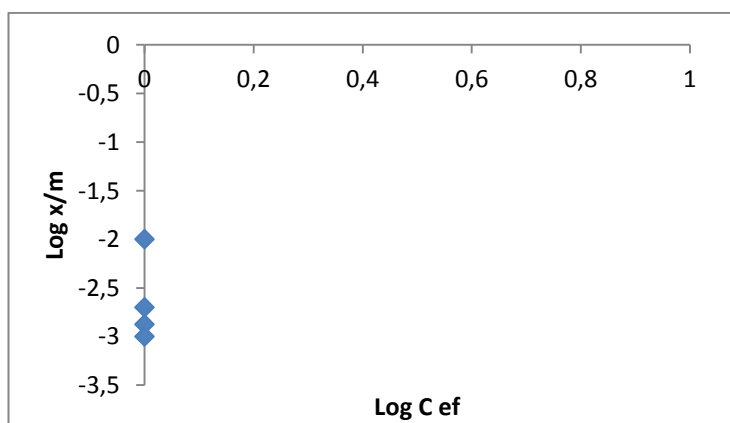
a	b
-1189	806,84

qm	b	R ²
0,0012394	-0,678587048	0,8957

Model Isoterm Adsorpsi Freundlich (Fe, SP, 40-50 mesh)

Waktu (jam)	Massa (g)	Vol (L)	Fe in (mg/l)	Fe ef (mg/l)	X (mg)	x/m (g/g)	Log C _{ef}	Log x/m	1/C _{ef}	1/(x/m)
3	0,2	0,1	0,02	0	0,002	0,01	#NUM!	-2	#DIV/0!	100
3	1	0,1	0,02	0	0,002	0,002	#NUM!	-2,698	#DIV/0!	500
3	1,5	0,1	0,02	0	0,002	0,0013	#NUM!	-2,875	#DIV/0!	750
3	2	0,1	0,02	0	0,002	0,001	#NUM!	-3	#DIV/0!	1000

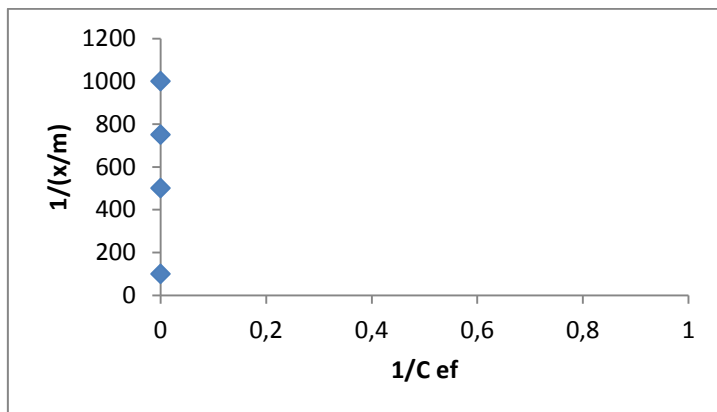
Log C _{ef}	Log x/m
#NUM!	-2
#NUM!	-2,69897
#NUM!	-2,87506
#NUM!	-3



Gambar 8a. Kurva model isoterm Freundlich.

Model Isoterm Adsorpsi Langmuir (Fe, SP, 40-50 mesh)

$1/C_{ef}$	$1/(x/m)$
#DIV/0!	100
#DIV/0!	500
#DIV/0!	750
#DIV/0!	1000



Gambar 8b. Kurva model isoterm Langmuir

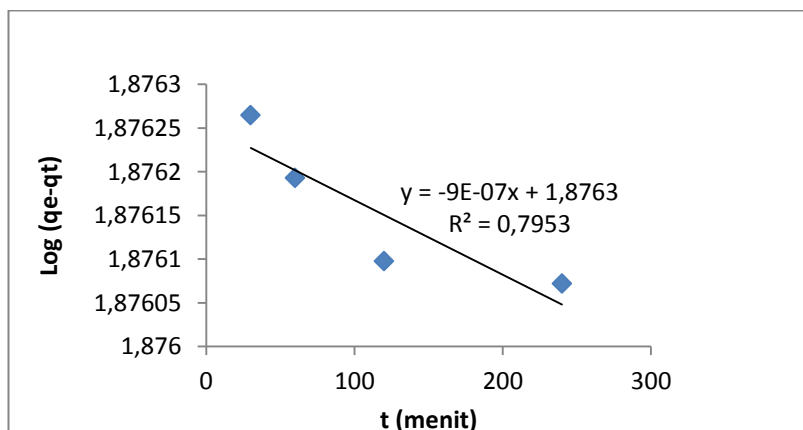
4. Perhitungan Kinetika Adsorpsi Adsorpsi Orde Satu Semu dan Orde Dua Semu

Model Kinetika Adsorpsi Orde Satu Semu (Cu, KAK, 10-20 mesh)

t (menit)	Co (mg/l)	Ce setimbang (mg/l)	Massa (g)	Vol (l)	qe (mg/g)
240	1,9	0,395	2	0,1	0,07525

t (menit)	Co (mg/l)	Ce (mg/l)	V (l)	qt (mg/g)	qe (mg/g)	log (qe- qt)
30	1,9	1,062	0,1	0,0419	75,25	1,876265
60	1,9	0,813	0,1	0,05435	75,25	1,876193
120	1,9	0,484	0,1	0,0708	75,25	1,876098
240	1,9	0,395	0,1	0,07525	75,25	1,876072

t (menit)	Log (qe-qt)
30	1,87626462
60	1,87619272
120	1,8760977
240	1,87607199



Gambar 9a. Kurva model kinetika Orde Satu Semu

$$y = ax + b$$

$$y = -9E-07x + 1,8763$$

$$\text{Log}(qe-qt) = - (K1/2,303)t + \text{Log } qe$$

a	b
-9,00E-07	1,8763

$$\text{Maka } K1 = a * 2,303 = -2,07E-06$$

$$\text{Log } qe = b = 1,6994$$

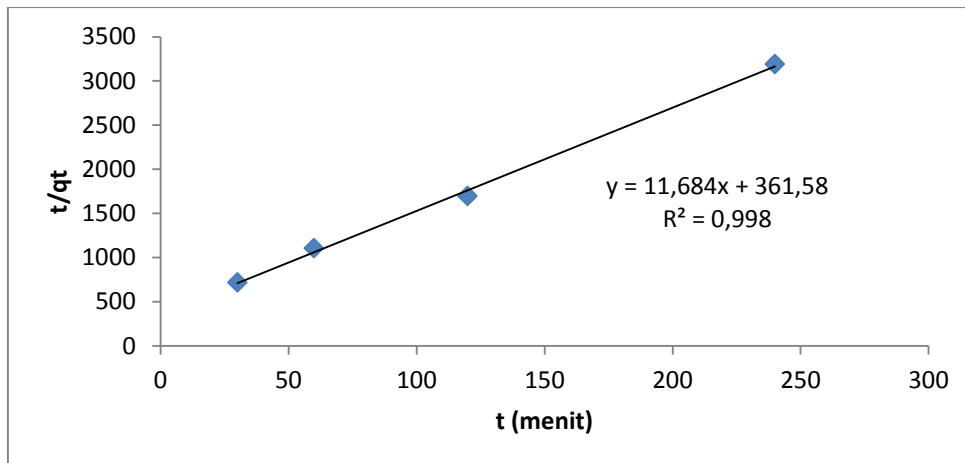
$$qe = 50,0495296$$

K1 (menit ⁻¹)	qe (mg/g)	R ²
-2,07E-06	50,04953	0,7953

Model Kinetika Adsorpsi Orde Dua Semu (Cu, KAK, 10-20 mesh)

t (menit)	Massa (g)	Co (mg/l)	Ce (mg/l)	V (l)	qt (mg/g)	t/qt
30	2	1,9	1,062	0,1	0,0419	715,9905
60	2	1,9	0,813	0,1	0,05435	1103,956
120	2	1,9	0,484	0,1	0,0708	1694,915
240	2	1,9	0,395	0,1	0,07525	3189,369

t (menit)	t/qt
30	715,9904535
60	1103,955842
120	1694,915254
240	3189,368771



Gambar 9b. Kurva model kinetika Orde Dua Semu

$$y = ax + b$$

$$y = 11,684x + 361,58$$

$$t/q_t = 1/q_e t + 1/(K_2 q_e^2)$$

a	b
11,684	361,58

$$\begin{aligned} \text{Maka} \quad 1/q_e &= 11,684 \\ q_e &= 0,085587128 \\ 1/(K_2 q_e^2) &= 361,58 \\ q_e^2 &= 0,007325156 \\ K_2 &= 0,37755367 \end{aligned}$$

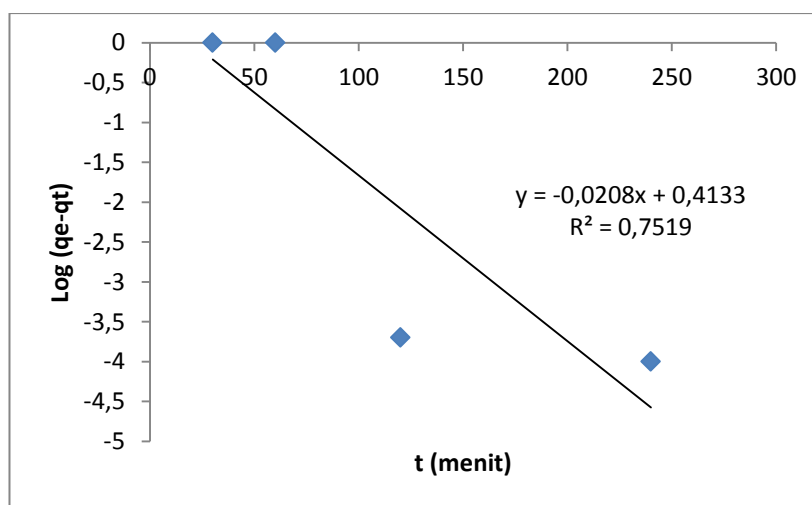
K ₂ (mg/g menit ⁻¹)	q _e (mg/g)	R ²
0,37755367	0,085587128	0,998

Model Kinetika Adsorpsi Orde Satu Semu (Fe, KAK, 10-20 mesh)

t (menit)	Co (mg/l)	Ce setimbang (mg/l)	Massa (g)	Vol (l)	qe (mg/g)
30	0,02	0,004	2	0,1	0,0008

t (menit)	Co (mg/l)	Ce (mg/l)	V (l)	qt (mg/g)	qe (mg/g)	Log (qe-qt)
30	0,02	0,004	0,1	0,0008	0,0008	#NUM!
60	0,02	0,004	0,1	0,0008	0,0008	#NUM!
120	0,02	0,008	0,1	0,0006	0,0008	-3,69897
240	0,02	0,006	0,1	0,0007	0,0008	-4

t (menit)	Log (qe-qt)
30	#NUM!
60	#NUM!
120	-3,69897
240	-4



Gambar 10a. Kurva model kinetika Orde Satu Semu

$$y = ax + b$$

$$y = -0,0208x + 0,4133$$

$$\text{Log}(q_e - q_t) = - (K_1/2,303)t + \text{Log } q_e$$

a	b
-0,0208	0,4133

$$\text{Maka } K_1 = a * 2,303 = -0,0479$$

$$\text{Log } q_e = b = 0,4133$$

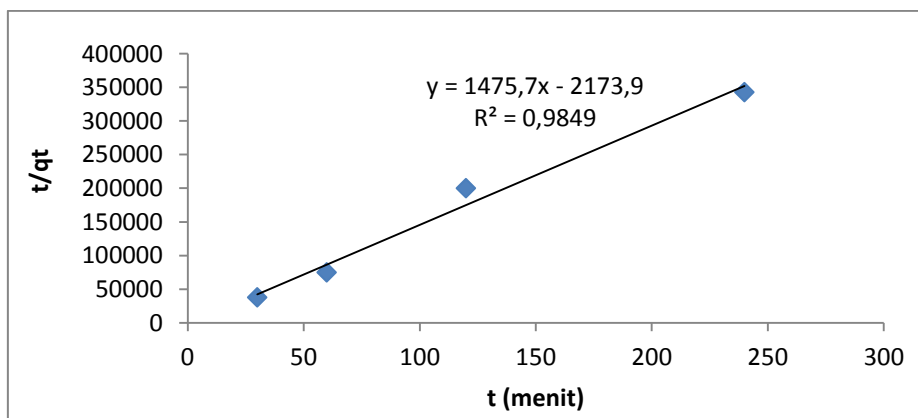
$$q_e = 2,59000141$$

K ₁ (menit ⁻¹)	q _e (mg/g)	R ²
-0,047902	2,59000141	0,7519

Model Kinetika Adsorpsi Orde Dua Semu (Fe, KAK, 10-20 mesh)

t (menit)	Massa (g)	Co (mg/l)	Ce (mg/l)	V (l)	qt (mg/g)	t/qt
30	2	0,02	0,004	0,1	0,0008	37500
60	2	0,02	0,004	0,1	0,0008	75000
120	2	0,02	0,008	0,1	0,0006	200000
240	2	0,02	0,006	0,1	0,0007	342857,1

t (menit)	t/qt
30	37500
60	75000
120	200000
240	342857,1429



Gambar 10b. Kurva model kinetika Orde Dua Semu

$$y = ax + b$$

$$y = 1475,7x - 2173,9$$

$$t/qt = 1/q_e t + 1/(K_2 q_e^2)$$

a	b
1475,7	-2173,9

Maka

$$\begin{aligned}
 1/q_e &= 1475,7 \\
 q_e &= 0,000677645 \\
 1/(K_2 q_e^2) &= -2173,9 \\
 q_e^2 &= 4,59202E-07 \\
 K_2 &= -1001,743636
 \end{aligned}$$

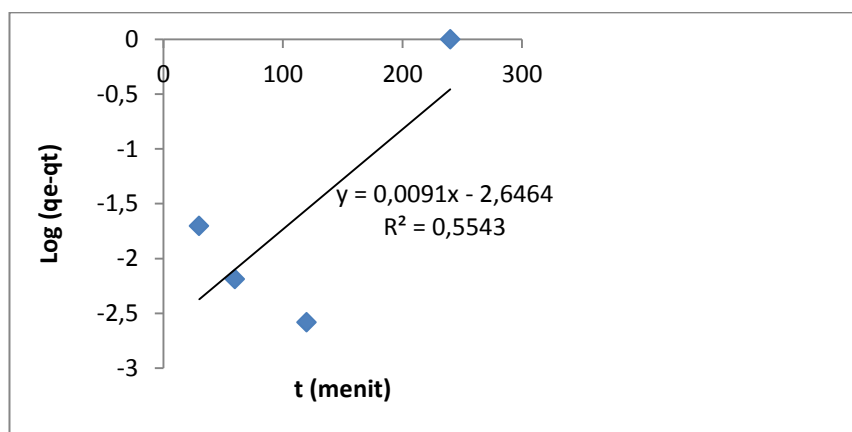
K ₂ (mg/g menit ⁻¹)	q _e (mg/g)	R ²
-1001,743	0,000677645	0,9849

Model Kinetika Adsorpsi Orde Satu Semu (Cu, KAK, 40-50 mesh)

t (menit)	Co (mg/l)	Ce setimbang (mg/l)	Massa (g)	Vol (l)	qe (mg/g)
240	1,9	1,138	2	0,1	0,0381

t (menit)	Co (mg/l)	Ce (mg/l)	V (l)	qt (mg/g)	qe (mg/g)	log (qe-qt)
30	1,9	1,534	0,1	0,0183	0,0381	-1,70333
60	1,9	1,267	0,1	0,03165	0,0381	-2,19044
120	1,9	1,19	0,1	0,0355	0,0381	-2,58503
240	1,9	1,138	0,1	0,0381	0,0381	#NUM!

t (menit)	Log (qe-qt)
30	-1,70333481
60	-2,190440285
120	-2,585026652
240	#NUM!



Gambar 11a. Kurva model kinetika Orde Satu Semu

$$y = ax + b$$

$$y = 0,0091x - 2,6464$$

$$\text{Log}(q_e - q_t) = - (K_1/2,303)t + \text{Log } q_e$$

a	b
0,0091	-2,6464

$$\text{Maka } K_1 = a * 2,303 = 0,020957$$

$$\text{Log } q_e = b = -2,6464$$

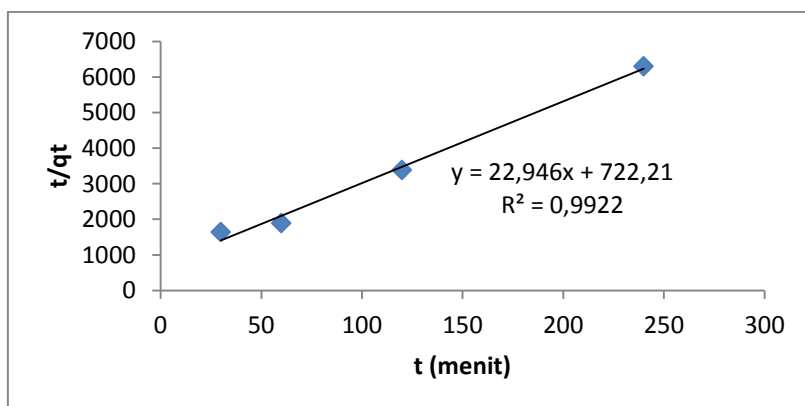
$$q_e = 0,0022574$$

K ₁ (menit ⁻¹)	q _e (mg/g)	R ²
0,0209573	0,002257356	0,5543

Model Kinetika Adsorpsi Orde Dua Semu (Cu, KAK, 40-50 mesh)

t (menit)	Massa (g)	Co (mg/l)	Ce (mg/l)	V (l)	qt (mg/g)	t/qt
30	2	1,9	1,534	0,1	0,0183	1639,344
60	2	1,9	1,267	0,1	0,03165	1895,735
120	2	1,9	1,19	0,1	0,0355	3380,282
240	2	1,9	1,138	0,1	0,0381	6299,213

t (menit)	t/qt
30	1639,344262
60	1895,734597
120	3380,28169
240	6299,212598



Gambar 11b. Kurva model kinetika Orde Dua Semu

$$y = ax + b$$

$$y = 22,946x + 722,21$$

$$t/qt = 1/q_e t + 1/(K_2 q_e^2)$$

a	b
22,946	722,21

$$\begin{aligned} \text{Maka} \quad 1/q_e &= 22,946 \\ q_e &= 0,043581 \\ 1/(K_2 q_e^2) &= 722,21 \\ q_e^2 &= 0,001899 \\ K_2 &= 0,729039 \end{aligned}$$

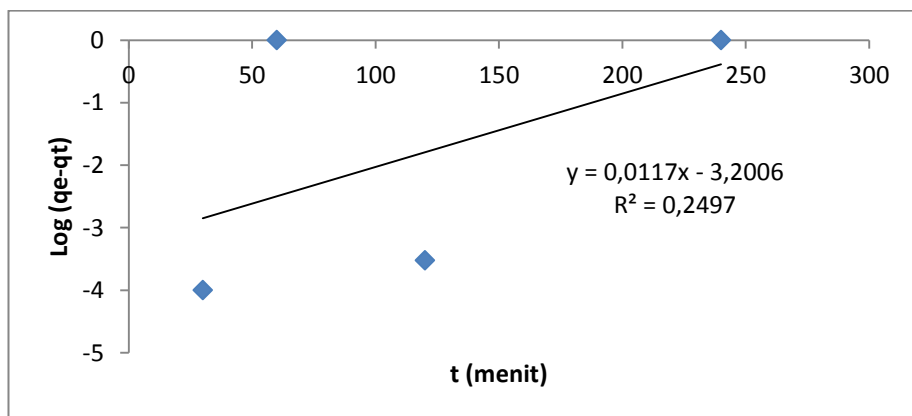
K ₂ (mg/g menit ⁻¹)	q _e (mg/g)	R ²
0,729038529	0,04358058	0,9922

Model Kinetika Adsorpsi Orde Satu Semu (Fe, KAK, 40-50 mesh)

t (menit)	Co (mg/l)	Ce setimbang (mg/l)	Massa (g)	Vol (l)	qe (mg/g)
60	0,02	0,004	2	0,1	0,0008

t (menit)	Co (mg/l)	Ce (mg/l)	V (l)	qt (mg/g)	qe (mg/g)	log (qe-qt)
30	0,02	0,006	0,1	0,0007	0,0008	-4
60	0,02	0,004	0,1	0,0008	0,0008	#NUM!
120	0,02	0,01	0,1	0,0005	0,0008	-3,52288
240	0,02	0,004	0,1	0,0008	0,0008	#NUM!

t (menit)	Log (qe-qt)
30	-4
60	#NUM!
120	-3,52287
240	#NUM!



Gambar 12a. Kurva model kinetika Orde Satu Semu

$$Y = ax + b$$

$$y = 0,0117x - 3,2006$$

$$\text{Log}(qe-qt) = -(K1/2,303)t + \text{Log } qe$$

a	b
0,0117	-3,2006

$$\text{Maka } K1 = a * 2,303 = 0,026945$$

$$\text{Log } qe = b = -3,2006$$

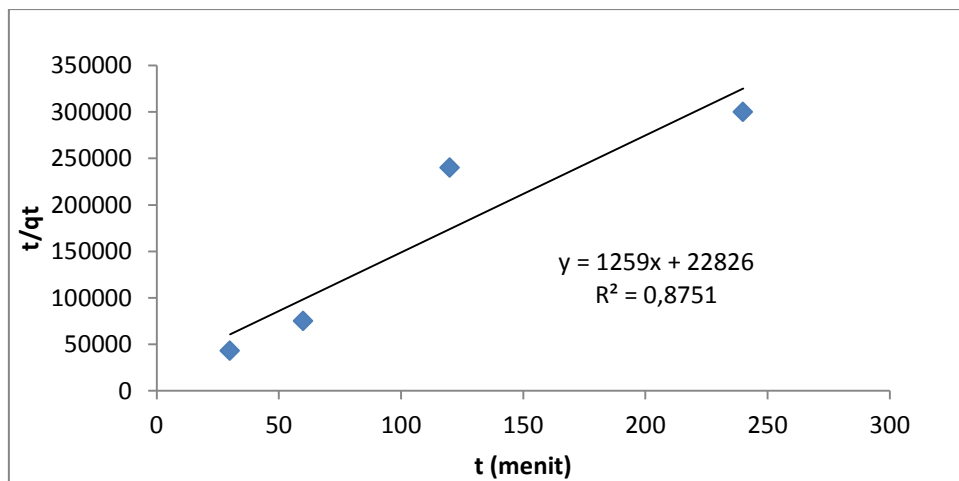
$$qe = 0,00063009$$

K1 (menit ⁻¹)	qe (mg/g)	R ²
0,0269451	0,000630086	0,2497

Model Kinetika Adsorpsi Orde Dua Semu (Fe, KAK, 40-50 mesh)

t (menit)	Massa (g)	Co (mg/l)	Ce (mg/l)	V (ml)	qt (mg/g)	t/qt
30	2	0,02	0,006	0,1	0,0007	42857,14
60	2	0,02	0,004	0,1	0,0008	75000
120	2	0,02	0,01	0,1	0,0005	240000
240	2	0,02	0,004	0,1	0,0008	300000

t (menit)	t/qt
30	42857,1429
60	75000
120	240000
240	300000



Gambar 12b. Kurva model kinetika Orde Dua Semu

$$y = ax + b$$

$$y = 1,259x + 0,3804$$

$$t/qt = 1/qe \cdot t + 1/(K2 \cdot qe^2)$$

a	b
1,259	0,3804

Maka $1/qe = 1,259$

$$qe = 0,794281$$

$$1/(K2 \cdot qe^2) = 0,3804$$

$$qe^2 = 0,630883$$

$$K2 = 4,16688$$

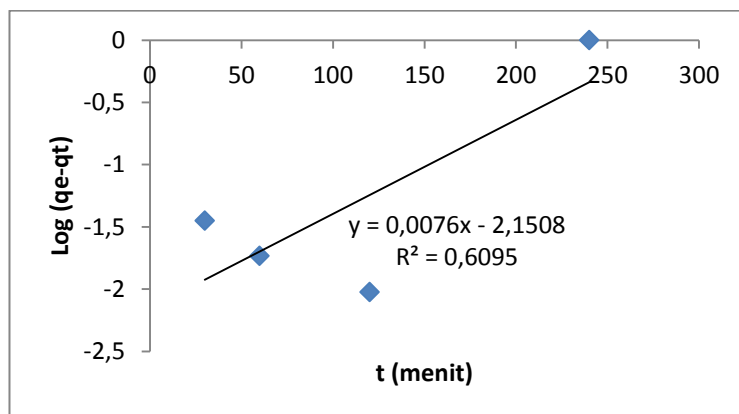
K2 (mg/g menit ⁻¹)	qe (mg/g)	R ²
4,16688	0,79428118	0,8751

Model Kinetika Adsorpsi Orde Satu Semu (Cu, SP, 10-20 mesh)

t (menit)	Co (mg/l)	Ce setimbang (mg/l)	Massa (g)	Vol (l)	qe (mg/g)
4	1,9	0,44	2	0,1	0,073

t (menit)	Co (mg/l)	Ce (mg/l)	V (l)	qt (mg/g)	qe (mg/g)	log (qe-qt)
30	1,9	1,15	0,1	0,0375	0,073	-1,44977165
60	1,9	0,81	0,1	0,0545	0,073	-1,73282827
120	1,9	0,63	0,1	0,0635	0,073	-2,02227639
240	1,9	0,44	0,1	0,073	0,073	#NUM!

t (menit)	log (qe-qt)
30	-1,44977
60	-1,73283
120	-2,02228
240	#NUM!



Gambar 13a. Kurva model kinetika Orde Satu Semu

$$y = ax + b$$

$$y = 0,0076x - 2,1508$$

$$\text{Log}(q_e - q_t) = - (K_1/2,303)t + \text{Log } q_e$$

a	b
0,0076	-2,1508

$$\text{Maka } K_1 = a * 2,303 = 0,017503$$

$$\text{Log } q_e = b = -2,1508$$

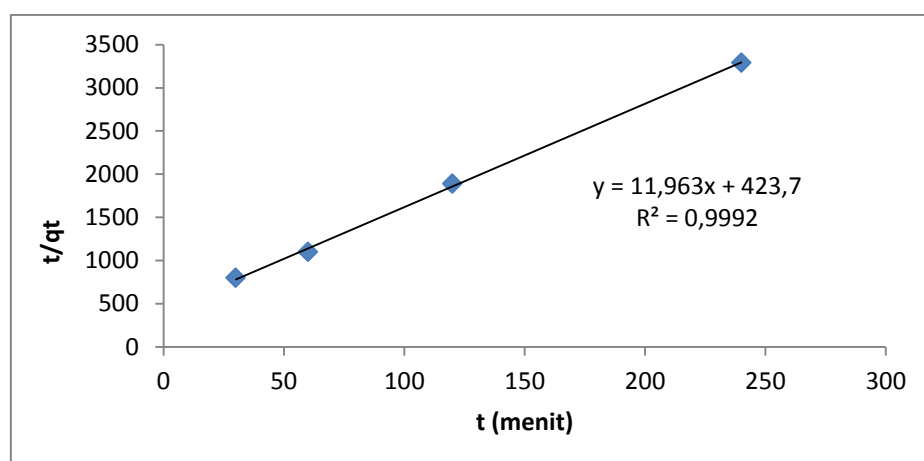
$$q_e = 0,007066$$

K ₁ (menit ⁻¹)	q _e (mg/g)	R ²
0,0175028	0,007066	0,6095

Model Kinetika Adsorpsi Orde Dua Semu (Cu, SP, 10-20 mesh)

t (menit)	Co (mg/l)	Ce (mg/l)	V (l)	qt (mg/g)	t/qt
30	1,9	1,15	0,1	0,0375	800
60	1,9	0,81	0,1	0,0545	1100,917
120	1,9	0,63	0,1	0,0635	1889,764
240	1,9	0,44	0,1	0,073	3287,671

t (menit)	t/qt
30	800
60	1100,917431
120	1889,76378
240	3287,671233



Gambar 13b. Kurva model kinetika Orde Dua Semu

$$y = ax + b$$

$$y = 11,963x + 423,7$$

$$t/qt = 1/q_e t + 1/(K_2 q_e^2)$$

a	b
11,963	423,7

Maka

$$\begin{aligned}
 1/q_e &= 11,963 \\
 q_e &= 0,083591 \\
 1/(K_2 q_e^2) &= 423,7 \\
 q_e^2 &= 0,006987 \\
 K_2 &= 0,337771
 \end{aligned}$$

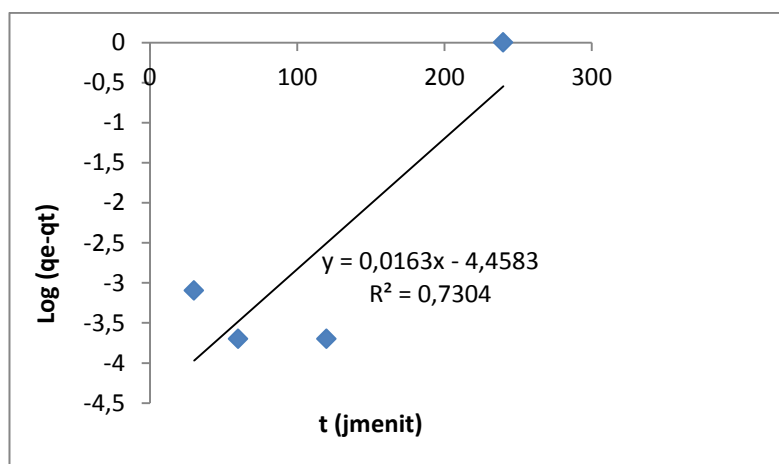
K ₂ (mg/g menit ⁻¹)	q _e (mg/g)	R ²
0,337770519	0,083591072	0,9992

Model Kinetika Adsorpsi Orde Satu Semu (Fe, SP, 10-20 mesh)

t (menit)	Co (mg/l)	Ce setimbang (mg/l)	Massa (g)	Vol (l)	qe (mg/g)
240	0,02	0,004	2	0,1	0,0008

t (menit)	Co (mg/l)	Ce (mg/l)	V (l)	qt (mg/g)	qe (mg/g)	log (qe-qt)
30	0,02	0,02	0,1	0	0,0008	-3,09691
60	0,02	0,008	0,1	0,0006	0,0008	-3,69897
120	0,02	0,008	0,1	0,0006	0,0008	-3,69897
240	0,02	0,004	0,1	0,0008	0,0008	#NUM!

t (menit)	log (qe-qt)
30	-3,09691
60	-3,69897
120	-3,69897
240	#NUM!



Gambar 14a. Kurva model kinetika Orde Satu Semu

$$y = ax + b$$

$$y = 0,0163x - 4,4583$$

$$\text{Log}(q_e - q_t) = - (K_1/2,303)t + \text{Log } q_e$$

a	b
0,0163	-4,4583

$$\text{Maka } K_1 = a * 2,303 = 0,037539$$

$$\text{Log } q_e = b = -4,4583$$

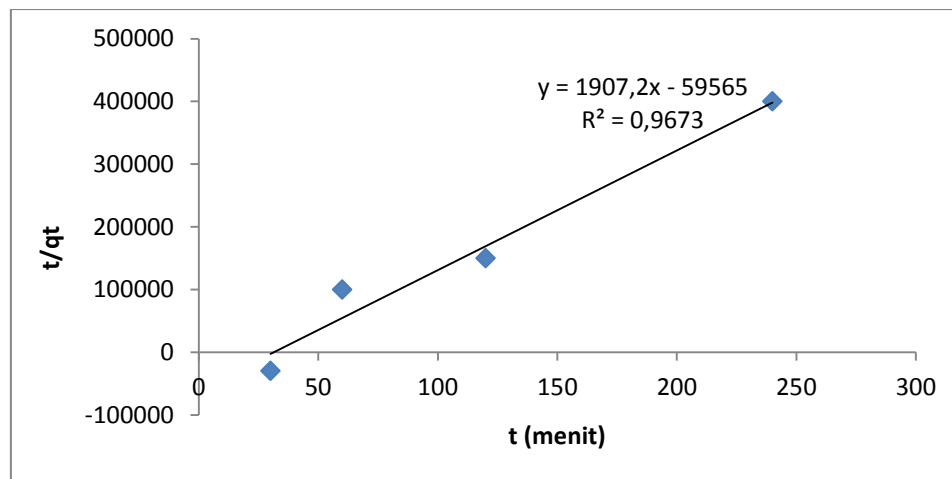
$$q_e = 3,48097\text{E-}05$$

K ₁ (menit ⁻¹)	q _e (mg/g)	R ²
0,0375389	3,48097E-05	0,7304

Model Kinetika Adsorpsi Orde Dua Semu (Fe, SP, 10-20 mesh)

t (menit)	Co (mg/l)	Ce (mg/l)	V (l)	qt (mg/g)	t/qt
30	0,02	0,04	0,1	-0,001	-30000
60	0,02	0,008	0,1	0,0006	100000
120	0,02	0,004	0,1	0,0008	150000
240	0,02	0,008	0,1	0,0006	400000

t (menit)	t/qt
30	-30000
60	100000
120	150000
240	400000



Gambar 14b. Kurva model kinetika Orde Dua Semu

$$y = ax + b$$

$$y = 1907,2x - 59565$$

$$t/qt = 1/q_e t + 1/(K_2 q_e^2)$$

a	b
1907,2	-59565

$$\begin{aligned} \text{Maka } 1/q_e &= 1907,2 \\ q_e &= 0,000524329 \\ 1/(K_2 q_e^2) &= -59565 \\ q_e^2 &= 2,74921E-07 \\ K_2 &= -61,06626106 \end{aligned}$$

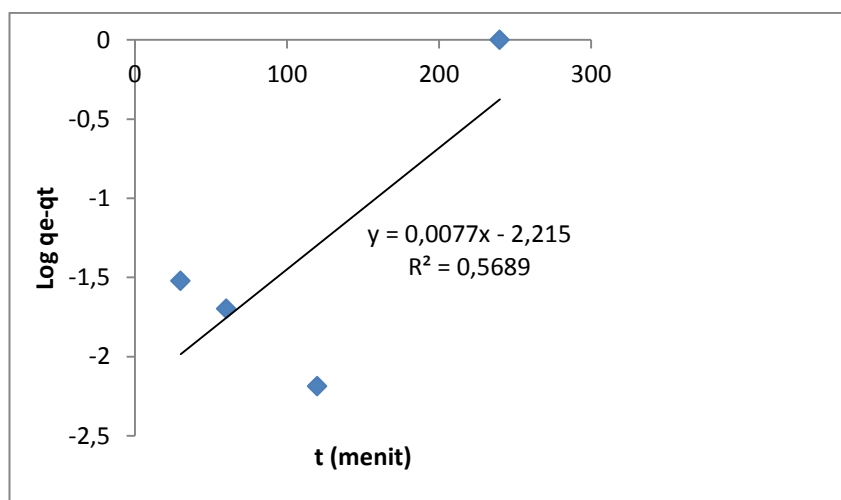
K ₂ (mg/g menit ⁻¹)	q _e (mg/g)	R ²
-61,06626106	0,00052433	0,9673

Model Kinetika Adsorpsi Orde Satu Semu (Cu, SP, 40-50 mesh)

t (menit)	Co (mg/l)	Ce setimbang (mg/l)	Massa (g)	Vol (l)	qe (mg/g)
40	1,9	0,32	2	0,1	0,079

t (menit)	Co (mg/l)	Ce (mg/l)	V (l)	qt (mg/g)	qe (mg/g)	log (qe-qt)
30	1,9	0,92	0,1	0,049	0,079	-1,52288
60	1,9	0,72	0,1	0,059	0,079	-1,69897
120	1,9	0,45	0,1	0,0725	0,079	-2,18709
240	1,9	0,32	0,1	0,079	0,079	#NUM!

t (menit)	log (qe-qt)
30	-1,522878745
60	-1,698970004
120	-2,187086643
240	#NUM!



Gambar 15a. Kurva model kinetika Orde Satu Semu

$$y = ax + b$$

$$y = 0,0077x - 2,215$$

$$\text{Log}(q_e - q_t) = - (K_1/2,303)t + \text{Log } q_e$$

a	b
0,0077	-2,215

Maka $K_1 = a * 2,303 = 0,017733$

$\text{Log } q_e = b = -2,215$

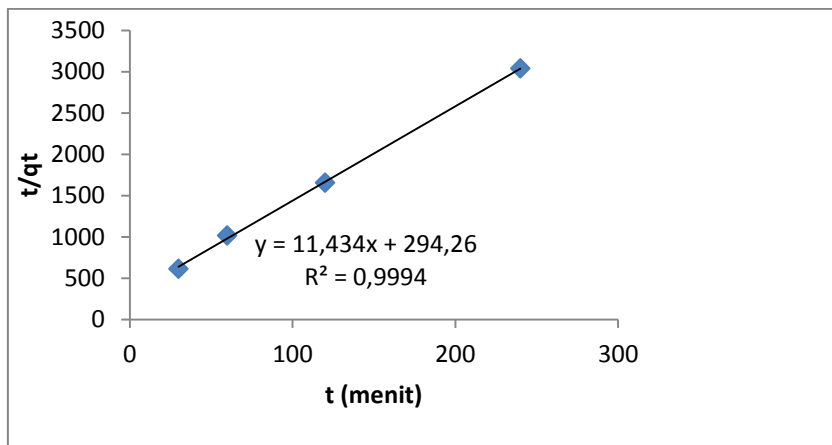
$q_e = 0,00609537$

K ₁ (menit ⁻¹)	q _e (mg/g)	R ²
0,0177331	0,00609537	0,5689

Model Kinetika Adsorpsi Orde Dua Semu (Cu, SP, 40-50 mesh)

t (menit)	Co (mg/l)	Ce (mg/l)	V (l)	qt (mg/g)	t/qt
30	1,9	0,92	0,1	0,049	612,2449
60	1,9	0,72	0,1	0,059	1016,949
120	1,9	0,45	0,1	0,0725	1655,172
240	1,9	0,32	0,1	0,079	3037,975

t (menit)	t/qt
30	612,244898
60	1016,949153
120	1655,172414
240	3037,974684



Gambar 15b. Kurva model kinetika Orde Dua Semu

$$y = ax + b$$

$$y = 11,434x + 294,26$$

$$t/qt = 1/q_e t + 1/(K_2 q_e^2)$$

a	b
11,434	294,26

$$\begin{aligned} \text{Maka } 1/q_e &= 11,434 \\ q_e &= 0,087458 \\ 1/(K_2 q_e^2) &= 294,26 \\ q_e^2 &= 0,007649 \\ K_2 &= 0,444289 \end{aligned}$$

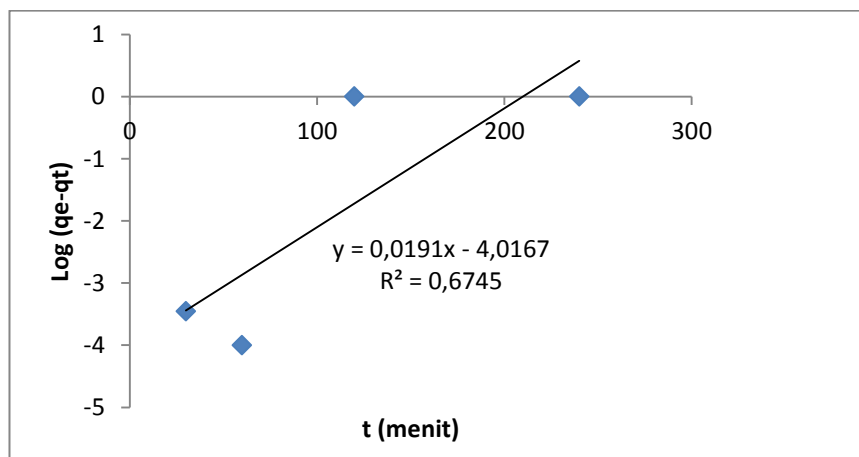
K ₂ (mg/g menit ⁻¹)	q _e (mg/g)	R ²
0,444288575	0,08745846	0,9994

Model Kinetika Adsorpsi Orde Satu Semu (Fe, SP, 40-50 mesh)

t (menit)	Co (mg/l)	Ce setimbang (mg/l)	Massa (g)	Vol (l)	qe (mg/g)
120	0,02	0,004	2	0,1	0,0008

t (menit)	Co (mg/l)	Ce (mg/l)	V (l)	qt (mg/g)	qe (mg/g)	log (qe-qt)
30	0,02	0,011	0,1	0,00045	0,0008	-3,455932
60	0,02	0,006	0,1	0,0007	0,0008	-4
120	0,02	0,004	0,1	0,0008	0,0008	#NUM!
240	0,02	0,004	0,1	0,0008	0,0008	#NUM!

t (menit)	log (qe-qt)
30	-3,455931956
60	-4
120	#NUM!
240	#NUM!



Gambar 16a. Kurva model kinetika Orde Satu Semu

$$y = ax + b$$

$$y = 0,0191x - 4,0167$$

$$\text{Log}(qe-qt) = - (K1/2,303)t + \text{Log } qe$$

a	b
0,0191	-4,0167

Maka $K1 = a * 2,303 = 0,043987$

$\text{Log } qe = b = -4,0167$

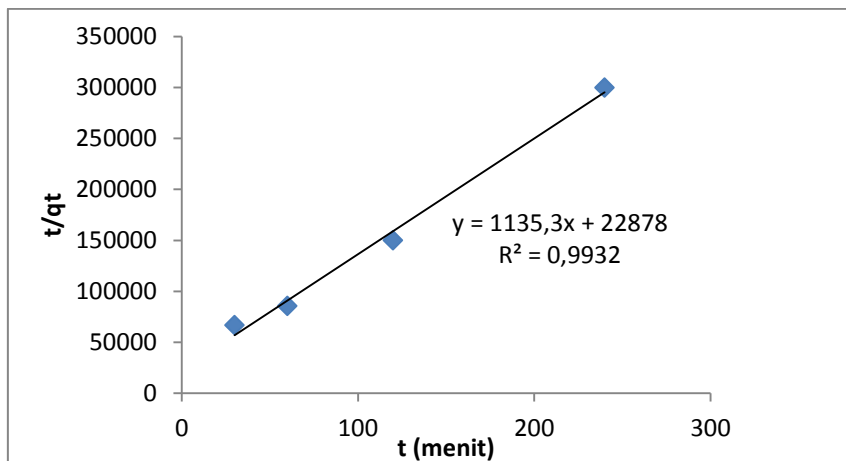
$qe = 9,62277E-05$

K1 (menit ⁻¹)	qe (mg/g)	R ²
0,0439873	9,62277E-05	0,6745

Model Kinetika Adsorpsi Orde Dua Semu (Fe, SP, 40-50 mesh)

t (menit)	Co (mg/l)	Ce (mg/l)	V (l)	qt (mg/g)	t/qt
30	0,02	0,011	0,1	0,00045	66666,67
60	0,02	0,006	0,1	0,0007	85714,29
120	0,02	0,004	0,1	0,0008	150000
240	0,02	0,004	0,1	0,0008	300000

t (menit)	t/qt
30	66666,67
60	85714,29
120	150000
240	300000



Gambar 16b. Kurva model kinetika Orde Dua Semu

$$y = ax + b$$

$$y = 1135,3x + 22878$$

$$t/qt = 1/q_e t + 1/(K_2 q_e^2)$$

a	b
1135,3	22878

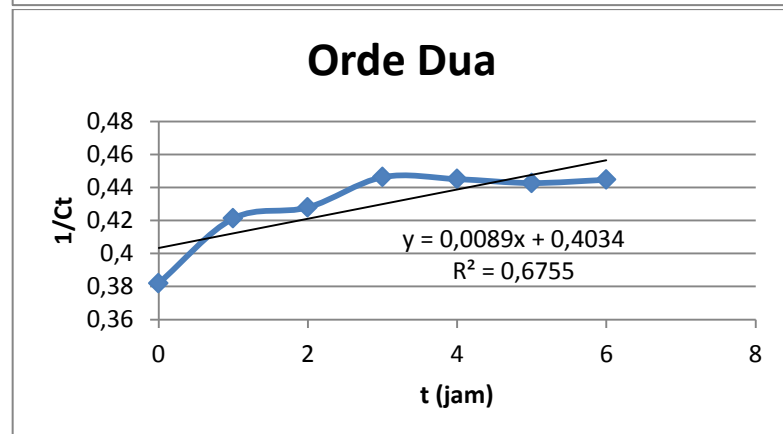
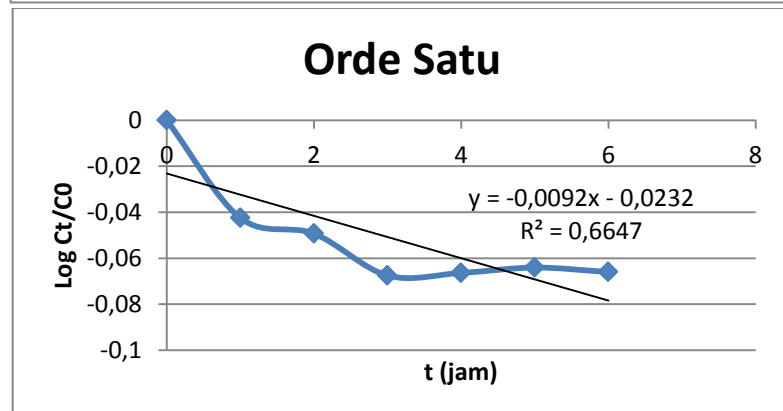
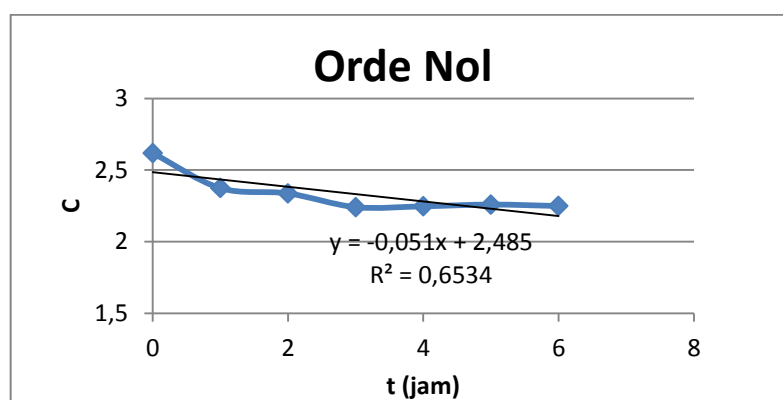
Maka

$$\begin{aligned}
 1/q_e &= 1135,3 \\
 q_e &= 0,000880824 \\
 1/(K_2 q_e^2) &= 22878 \\
 q_e^2 &= 7,75852E-07 \\
 K_2 &= 56,3382328
 \end{aligned}$$

K ₂ (mg/g menit ⁻¹)	q _e (mg/g)	R ²
56,33823	0,000880824	0,9932

5 Orde Reaksi

Waktu (detik)	Waktu (jam)	C (mg/l)	Ct/C0	Log Ct/C0	1/Ct
0	0	2,618	1	0	0,381971
3600	1	2,374	0,906799	-0,0424	0,42123
7200	2	2,337	0,892666	-0,0493	0,427899
10800	3	2,241	0,855997	-0,0675	0,446229
14400	4	2,247	0,858289	-0,0663	0,445038
18000	5	2,259	0,862872	-0,0640	0,442674
21600	6	2,249	0,859053	-0,0659	0,444642



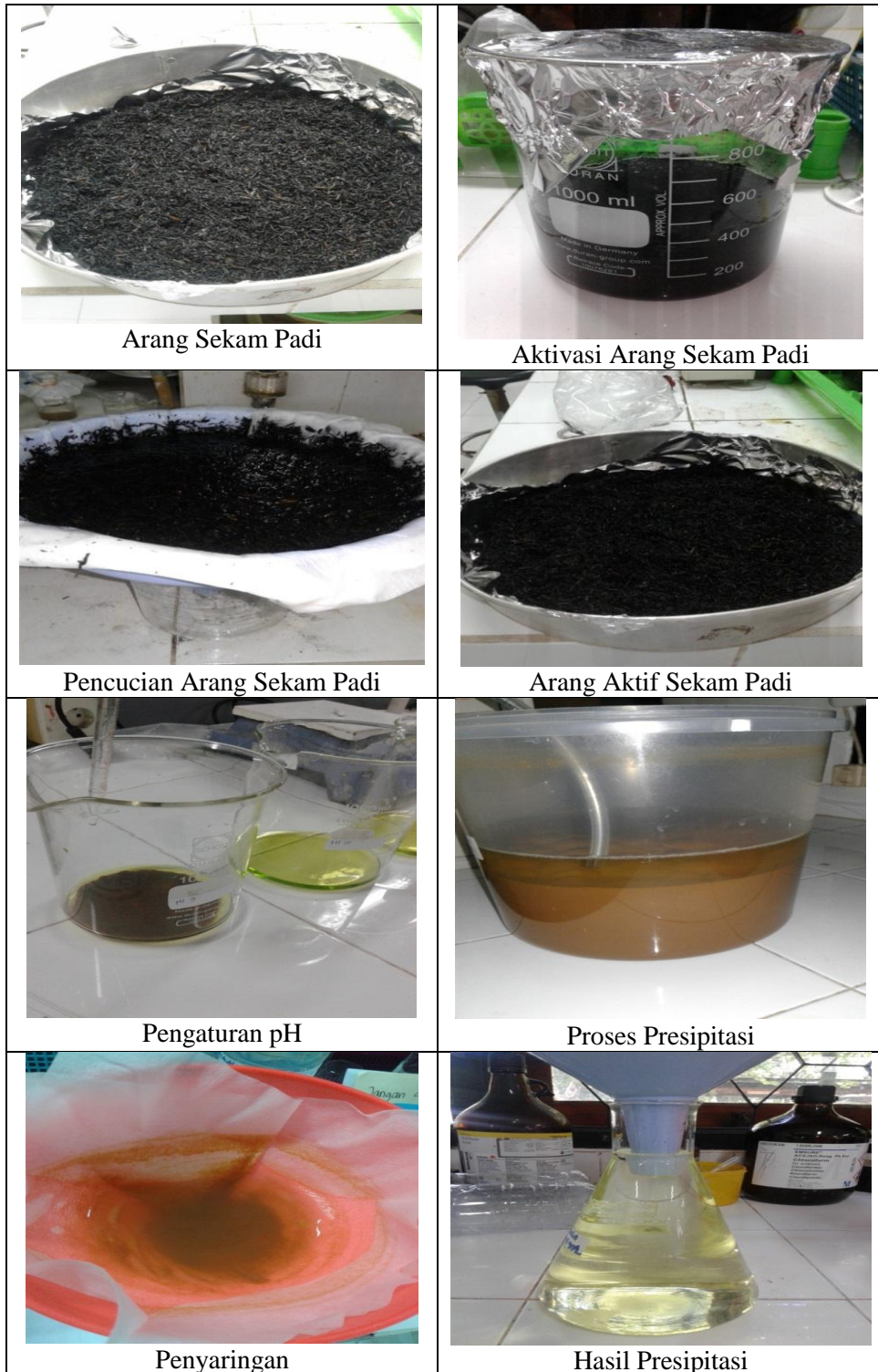
6 Kinetika Adsorpsi Kontinyu

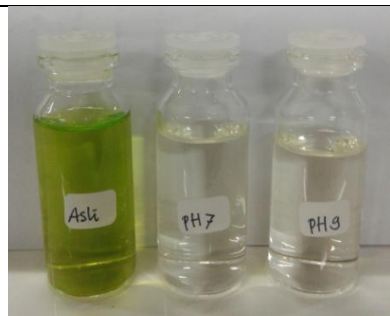
No	Waktu (menit)	Co (mg/l)	Ct (mg/l)	Ln (Co/Ct-1)	Ct/Co
1.	60	10,39	8,19	-1,31446	0,788258
2.	120	10,39	8,22	-1,33184	0,791145
3.	180	10,39	8,4	-1,4401	0,80847
4.	240	10,39	8,89	-1,77946	0,85563
5.	300	10,39	8,81	-1,71846	0,847931
6.	360	10,39	8,89	-1,77946	0,85563
7.	420	10,39	8,8	-1,71102	0,846968
8.	480	10,39	8,68	-1,62453	0,835419
9.	540	10,39	9,01	-1,87625	0,86718
10.	600	10,39	8,69	-1,63154	0,836381
11.	660	10,39	9,04	-1,90155	0,870067
12.	720	10,39	8,74	-1,66713	0,841193
13.	780	10,39	8,69	-1,63154	0,836381
14.	840	10,39	8,56	-1,54278	0,823869
15.	900	10,39	8,58	-1,55611	0,825794
16.	960	10,39	8,77	-1,68891	0,844081
17.	1020	10,39	8,41	-1,44632	0,809432
18.	1080	10,39	8,07	-1,24659	0,776708
19.	1140	10,39	9,29	-2,13363	0,894129
20.	1200	10,39	9,17	-2,01709	0,882579
21.	1260	10,39	9,38	-2,22863	0,902791
22.	1320	10,39	9,28	-2,1235	0,893167
23.	1380	10,39	9,25	-2,0936	0,890279
24.	1440	10,39	9,48	-2,34349	0,912416

No	Waktu (menit)	Co (mg/l)	Ct (mg/l)	Ln (Co/Ct-1)	Ct/Co
1.	5	10,39	1,034	2,2025	0,0995
2.	10	10,39	1,055	2,1802	0,1015
3.	15	10,39	1,071	2,1634	0,1030
4.	20	10,39	1,099	2,1346	0,1057
5.	25	10,39	1,249	1,9904	0,1202
6.	30	10,39	1,137	2,0965	0,1094
7.	35	10,39	1,337	1,9126	0,1286
8.	40	10,39	2,19	1,3202	0,2107
9.	45	10,39	2,44	1,1811	0,2348
10.	50	10,39	2,518	1,1398	0,2423
11.	55	10,39	2,99	0,9062	0,2877
12.	60	10,39	8,19	-1,3144	0,7882
13.	65	10,39	8,22	-1,3318	0,7911
14.	70	10,39	8,5	-1,5034	0,8180

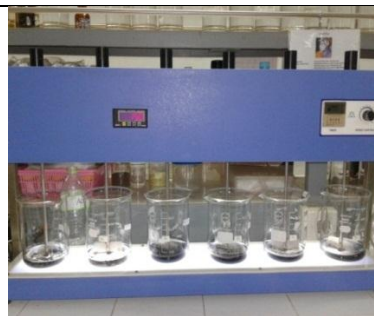
“Halaman ini sengaja dikosongkan”

LAMPIRAN C
DOKUMENTASI PENELITIAN

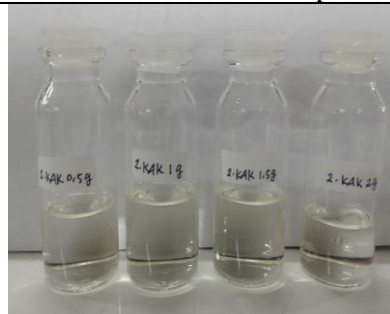




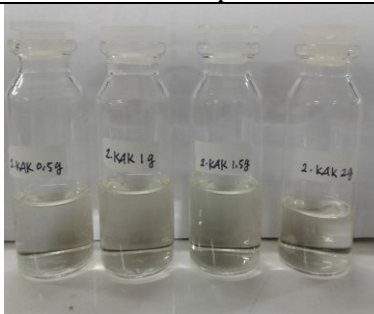
Perbedaan Warna Sampel



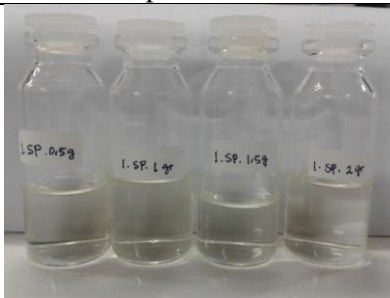
Proses Adsorpsi *Batch*



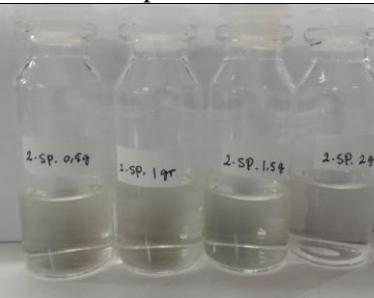
Hasil Adsorpsi KAK 10-20 mesh



Hasil Adsorpsi KAK 40-50mesh



Hasil Adsorpsi SP 10-20 mesh



Hasil Adsorpsi SP 40-50 mesh



Proses Adsorpsi Kontinyu



Analisis SEM-EDX

BIODATA PENULIS



Penulis yang mempunyai nama lengkap Maria Angelina Tuas dilahirkan di Kiupukan pada tanggal 11 Maret 1993, merupakan anak kedua dari empat bersaudara. Pendidikan formal yang telah ditempuh penulis yaitu SDN Nispukan tahun 1999-2005, SLTP Negeri 2 Atambua tahun 2005-2008, SMA Negeri 1 Insana pada tahun 2008-2011, Program Sarjana di Kimia FST Undana Kupang pada tahun 2011-2015. Pada tahun 2016, penulis diterima di program Magister Teknik Lingkungan ITS melalui Beasiswa LPDP dan terdaftar dengan NRP 3316 201 009. Penulis pernah menjadi pembicara dalam Seminar Nasional Sains dan Antariksa yang diselenggarakan oleh Lapan, ITB dan Undana pada tahun 2015. Berbagai kegiatan seminar dan pelatihan telah diikuti oleh penulis dalam rangka menambah wawasan serta pengembangan diri. Penulis dapat dihubungi via email melalui alamat angeltuas@yahoo.com atau angeltuas03@gmail.com.